This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY
of the Harvard College Library

This book is
FRAGILE
and circulates only with permission.
Please handle with care
and consult a staff member
before photocopying.

Thanks for your help in preserving
Harvard's library collections.

HARVARD
COLLEGE
LIBRARY

ÉTUDE

SUR LE

MOUVEMENT DES MARÉES

DANS

LA PARTIE MARITIME DES FLEUVES

Paris. — Imprimé par E. Trunot et Cie, 26, rue Racine.

ÉTUDE

SUR LE

MOUVEMENT DES MARÉES

DANS

LA PARTIE MARITIME DES FLEUVES

PAR

M. L. PARTIOT

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES
Chevalier de la Légion d'honneur.

PARIS.

DUNOD, ÉDITEUR,

SUCCESSEUR DE Vᵉᵉ DALMONT,

Précédemment Carilian-Goury et Victor Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPERIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, 49.

1861

Eng 1018.61.7

HARVARD COLLEGE
SEP 8 1922
LIBRARY

DEGRAND FUND
zoolo

AVERTISSEMENT.

Étant chargé, comme ingénieur ordinaire des ponts et chaussées, du service de la navigation de la Seine dans la partie la plus voisine de la mer, le mouvement des marées dans ce fleuve et les circonstances favorables ou défavorables qu'elles y présentent pour la marche des navires ont dû être l'objet d'une partie de nos études. Grâce à la bienveillante complaisance de plusieurs ingénieurs, parmi lesquels nous sommes heureux de citer MM. Jégou, Lechalas, Pairier et Joly, nous avons pu comparer les marées dans la Seine à celles de la plupart des autres fleuves de France. Les faits que nous avons pu constater et les conséquences immédiates qui s'en déduisent nous ont paru nouveaux ou peu connus, et nous avons cru qu'il serait peut-être utile de les publier. Nous n'avons d'ailleurs d'autre prétention que de faire connaître le peu que nous avons appris, pour qu'il serve plus tard à de nouvelles études.

Ce travail sera partagé en deux chapitres. Dans le

premier, nous examinerons les principales lois du mouvement des marées; dans l'autre, nous exposerons ce que nous avons pu savoir du régime des rivières à marée dans la partie maritime de leur cours, c'est-à-dire des changements que la marche de l'ondulation de la marée peut subir par les diverses circonstances propres au cours d'eau.

ÉTUDE

SUR

LE MOUVEMENT DES MARÉES

DANS LA PARTIE MARITIME DES FLEUVES.

CHAPITRE PREMIER.

LOIS GÉNÉRALES DU MOUVEMENT DES MARÉES DANS LES FLEUVES.

Mouvement de la marée dans les fleuves. — Si l'on considère une rivière à marée au moment où la mer est basse à son embouchure, on voit en général qu'elle présente une pente vers l'aval sur toute la partie inférieure de son cours. Si l'on se place à un point situé à un kilomètre de la mer, au moment où celle-ci commence à monter, on observe bientôt que la pente du fleuve diminue par suite de l'exhaussement des eaux du large. La surface de l'eau semble, pour ainsi dire, tourner autour d'une charnière horizontale, de telle sorte que sa pente devient de plus en plus faible, sans cesser d'abord d'être inclinée vers la mer. Dans ces premiers moments de la marée montante, le niveau de la rivière s'élève, bien que ses eaux continuent à se diriger vers l'aval. Mais peu à peu leur vitesse décroît avec leur inclinaison, et il arrive un instant où l'une et l'autre deviennent nulles. Alors le courant descendant, que l'on désigne sous le nom de *jusant*, d'*ébe* ou de *reflux*, s'arrête; les eaux restent un certain temps comme indécises, ou sui-

vant l'expression des marins, *étale*, sans se diriger nettement vers la mer ni vers la source. Cet étale, qui marque la fin du jusant, s'appelle *étale de jusant*. La mer continant à s'élever, la pente du fleuve s'incline vers l'amont, et ses eaux commencent à remonter son cours. Le courant qui s'établit de l'aval à l'amont est le *courant de flot* ou *de flux*, et la masse des eaux qui remonte est ce qu'on appelle *le flot*. Lorsque l'eau arrive à son niveau le plus élevé au point où l'on s'est placé pour observer sa marche, la pente du fleuve est généralement encore inclinée vers l'amont. Elle conserve un certain temps cette pente tandis que le niveau des eaux commence à descendre. Mais la surface du fleuve tourne de nouveau, en amont, comme au tour d'une charnière horizontale perpendiculaire à son cours, et sa pente diminue par l'abaissement de son niveau au point où l'on se trouve. Le courant de flot persiste donc après l'instant du plein. Mais il arrive un moment où l'eau a assez descendu pour que sa pente devienne nulle. Elle perd alors sa vitesse, et il y a un nouvel étale que l'on désigne sous le nom d'*étale de flot*. Puis, la pente s'incline vers la mer par l'abaissement des eaux vers l'aval, et le *jusant* recommence. Il dure jusqu'après la basse mer, comme nous l'avons indiqué tout à l'heure.

Ces phénomènes, auxquels le mouvement alternatif des marées donne naissance auprès de l'embouchure des fleuves, se reproduisent sur une partie de leur cours par l'exhaussement successif de leurs eaux et par la propagation des marées dans leur lit. On observe donc sur chaque point du fleuve, dans son état normal, les courants de jusant et de flot, les pleines et les basses mers, et les étales de flot et de jusant.

Si l'on examine le mouvement d'une molécule des eaux du fleuve, on voit qu'elle coule et descend d'abord vers la mer avec le jusant; sa vitesse diminue quand elle arrive à un point où la marée montante commence à rendre la pente

des eaux plus faible ; elle s'arrête pendant l'étale de jusant, où le niveau du fleuve est à peu près horizontal. Elle est ensuite poussée et relevée par les molécules qui viennent de l'aval, et elle ne tarde pas à se trouver plus haute que celles qui la suivaient d'abord. Elle descend alors vers l'amont, en les refoulant à son tour. Le mouvement rétrograde de chaque goutte d'eau continue jusqu'à l'étale de flot, où la pente du fleuve redevient nulle. A ce moment elle s'arrête, et elle reprend bientôt sa marche vers la mer, quand la surface de l'eau s'incline de nouveau vers l'aval. L'espace que parcourt chaque goutte avec le jusant étant plus long que celui qu'elle remonte avec le flot, elle arrive peu à peu à l'embouchure du fleuve et va se perdre dans la mer.

Ainsi, chaque molécule liquide est successivement repoussée vers la source par celle qui la précédait vers l'aval, et transmet à son tour la pression et le mouvement à celle qui la suivait immédiatement. Il y a donc là deux vitesses bien distinctes : celle de la molécule elle-même ou du courant de l'eau, et celle de la transmission du mouvement de molécule à molécule ou de la propagation du flot. Chaque goutte liquide est sollicitée non-seulement par la pression des eaux d'aval qui la reportent vers l'amont, mais encore par l'effet de l'attraction du soleil et de la lune qui est la cause primitive du phénomène des marées, et dont l'action ne cesse pas de se faire sentir.

D'après ce qui précède, on voit que les gouttes d'eau de mer qui se trouvent à l'embouchure des fleuves ne doivent pénétrer qu'à une petite distance dans leur lit. C'est ce qui explique pourquoi l'eau n'est salée que sur une très-petite partie de leur longueur, tandis que les dénivellations de la marée se propagent à une grande distance dans l'intérieur des terres.

L'ensemble du mouvement des molécules de l'eau d'un fleuve donne naissance à une longue ondulation qui remonte

vers sa source. Des observations faites sur différentes rivières à marée permettent d'y suivre la marche de cette ondulation. Citons celles qui ont été faites sur la Seine.

Observations faites sur la Seine. — Des échelles hydrométriques ont été placées sur plusieurs points dans toute la partie de ce fleuve où les marées se font sentir, c'est-à-dire depuis Poses jusqu'au Havre. Les zéros de ces échelles ont été rattachés au plan général de comparaison du nivellement de la Seine ; on les a mis au même niveau, partout où il n'y avait pas d'anciennes échelles, scellées dans des maçonneries et où des observations se faisaient de vieille date. Des nivellements de la Seine, de Rouen au Havre, ont été faits avec le plus grand soin, à diverses reprises. Le dernier, qui a été opéré par M. Brasseur, conducteur des ponts et chaussées, a été vérifié par un nivellement de précision exécuté par M. Bourdaloue entre les mêmes points, en suivant le chemin de fer ; la différence entre les deux opérations n'a été que de 9 millimètres. La cote du zéro des échelles est ainsi très-exactement connue.

On fait régulièrement, chaque jour, différentes observations à ces échelles. Des observateurs sont spécialement désignés pour chacune d'elles, et sont payés sur les fonds du service de la Seine. Les heures leur sont données par le marégraphe de Quillebeuf, par les horloges des phares, et par les montres que chacun d'eux possède. Ces chronomètres sont tous réglés avec soin sur l'heure prise en temps moyen au méridien de Paris.

Outre l'avantage de présenter une seule unité de temps qui permet de rendre plus comparables les études faites sur divers points, l'heure moyenne de Paris sert généralement à régler la marche des trains des chemins de fer qui longent les principales rivières à marées de France, et il est, par cela même, très-facile de la connaître ; sur le chemin de fer de Paris au Havre, elle est indiquée, dans les stations, par les horloges qui donnent sur la voie, et un agent

spécial est chargé de les régler tous les huit jours. Ces divers motifs nous ont fait prendre l'heure en temps moyen au méridien de Paris, et nous ne pouvons qu'émettre le vœu qu'elle soit adoptée dans toutes les études hydrométriques à faire sur les côtes de France et qu'il devienne ainsi plus facile d'établir entre elles des comparaisons.

Les observations journalières, faites à la plupart des échelles hydrométriques de la Seine maritime, comprennent le relevé des heures et des cotes de pleine et de basse mer et du commencement et de la fin de chaque étale. Chaque feuille d'observations est double : d'un côté se trouve une instruction spéciale et un espace réservé aux remarques du conducteur chargé de surveiller les observations. Sur le verso, l'on a mis les colonnes que l'observateur doit remplir. On trouvera l'entête de ces colonnes et cette instruction à la fin de cet ouvrage (note A). Ces feuilles sont exactement tenues depuis la Bouille jusqu'à Quillebeuf. En amont et en aval, on se contente de noter les heures et les cotes des pleines et des basses mers et la direction et l'intensité du vent, les phénomènes relatifs aux étales étant beaucoup plus difficiles à constater.

Outre ces observations journalières, on a fait faire à différentes époques des observations spéciales pendant une journée entière, pour suivre le mouvement d'une même ondulation de la marée. Les montres des observateurs ont été vérifiées la veille et le lendemain de chaque journée d'observations, de manière à obtenir des cotes prises exactement aux mêmes heures sur toute la Seine maritime. Les hauteurs d'eau ont été relevées soit de quart d'heure en quart d'heure, soit de cinq en cinq minutes, à chaque échelle.

En prenant les hauteurs de l'eau à une même heure et en les rapportant sur un profil en long de la Seine, on obtient approximativement le profil longitudinal de la surface de ce fleuve à l'instant que l'on considère. Les profils de ce genre diffèrent à chaque instant et suivant le moment qu'on a choisi ;

nous les désignerons pour ce motif sous le nom de *profils momentanés*. La suite des profils momentanés relatifs à un même jour donne une idée assez nette de l'ondulation que produit la marée dans la Seine et que nous avons à examiner.

Observation de la marche d'une marée. — Prenons une série d'observations qui a été faite le 24 septembre 1860. Les hauteurs d'eau ont été relevées ce jour-là de cinq en cinq minutes, depuis cinq heures du matin jusqu'à sept heures du soir, et toutes les précautions indiquées ci-dessus ont été prises pour que les montres des différents observateurs fussent réglées sur l'heure moyenne de Paris. Les observations ont été faites partout avec le plus grand soin, et nous croyons qu'on peut compter sur leur entière exactitude. Suivons les profils momentanés de la Seine qui en résultent (fig. 8).

A midi la mer était basse au Havre. La Seine présentait alors sur toute sa longueur des pentes inclinées vers la mer. Les bancs qui encombrent l'embouchure du fleuve au-dessous de Quillebeuf forment comme un long déversoir, sur lequel les eaux s'écoulaient avec une pente rapide. En amont, la pente était beaucoup moindre jusqu'à Pont-de-l'Arche. A 3^h 5′ la marée avait atteint son niveau le plus bas à Quillebeuf, tandis qu'elle montait depuis 25′ à Tancarville. Dans cet espace de temps, elle s'était élevée de $0^m.09$ sur ce dernier point. On a observé qu'à Quillebeuf, à 3^h 5′, le courant continuait à se diriger vers la mer. Ce mouvement a persisté jusqu'à 3^h 40′ aux bords du fleuve et jusqu'à 4^h 15′ au milieu. Entre Tancarville et Quillebeuf, la pente de la Seine s'abaissait vers l'amont de 0,007 par kilomètre à 3^h 40′ et de 0.053 par kilomètre à 4^h 15′. Le mouvement des eaux vers la mer ne s'est donc arrêté que lorsqu'il y a eu une contre pente en sens inverse de leur direction. Elles sont ensuite restées stationnaires jusqu'à 4^h sur les bords et jusqu'à 4^h 25′ au milieu du

fleuve, et elles ont alors pris un mouvement ascensionnel vers l'amont. La pente entre Tancarville eu Quillebeuf était devenue de 0,030 par kilomètre à 4^h, et de 0,055 par kilomètre à 4^h 25′. De 4^h à 4^h 15′il y avait courant de flot sur les bords, et de jusant au milieu du fleuve. A 6^h 25′ la mer était au plus haut à Quillebeuf. La pente s'inclinait encore alors très-nettement vers l'amont et les eaux s'écoulaient dans le même sens. Le courant de flot a cessé de se produire à 7^h aux bords et à 7^h 40′ au milieu de la Seine. Les observations de 5 en 5′ ont cessé à 7^h, mais on a continué à observer les mouvements des courants de marée, à Quillebeuf, jusqu'à 7^h 50′ du soir. L'eau y est restée stationnaire de 7^h à 7^h 25′ aux bords du fleuve et de 7^h 40′ à 7^h 50′ au milieu, puis elle a repris son cours vers la mer. A 7^h le niveau de la Seine entre le phare du Courval et Quillebeuf s'abaissait vers l'aval de $0^m.003$ par kilomètre. De 7^h 25′ à 7^h 40′ du soir il y a eu courant de flot au milieu de la rivière et courant de jusant auprès des bords.

Les mêmes profils montrent assez clairement les périodes de basse mer, d'étale de jusant, de pleine mer et d'étale de flot que nous avons signalées. Les étales de flot et de jusant correspondent aux moments où le niveau de la rivière est à peu près horizontal. S'ils en diffèrent d'une quantité d'ailleurs minime, il faut l'attribuer au mouvement acquis par la masse des eaux de la Seine. Les courants continuent à s'avancer vers la mer ou vers l'intérieur jusqu'à ce que le fleuve présente une petite inclinaison en sens inverse de la direction suivant laquelle les eaux s'écoulent.

Les profils momentanés que nous venons d'examiner font aussi voir nettement la marche et la forme générale de l'onde-marée qui pénètre en Seine. Elle s'allonge à mesure qu'elle s'éloigne du Havre et qu'elle s'étend dans les parties profondes qui sont en amont de Quillebeuf.

Marées de vive-eau et marées de morte-eau. — Les mouvement des marées varient dans les fleuves avec l'amplitude

de celles qui ont lieu à leur embouchure. Les plus grandes se produisent au moment des pleines et nouvelles lunes et les plus petites correspondent aux quadratures. Les premières s'appellent *marées de vive-eau* et les secondes *marées de morte-eau.* On a observé que les plus fortes marées de vive-eau et les plus plus faibles marées de morte-eau sur nos côtes sont celles qui sont les plus voisines de la 36e heure après l'instant de la pleine ou nouvelle lune ou du quartier. Les marées qui ont lieu entre la plus haute marée de vive-eau et la plus basse de morte-eau peuvent être considérées comme intermédiaires. Dans ces études, nous n'examinerons que les marées extrêmes indiquées par les phases de la lune. Les phénomènes relatifs aux autres marées que nous avons eu l'occasion d'observer, n'ont été que des intermédiaires entre ceux que nous avons pu constater pour celles-ci.

Mouvement de chaque molécule fluide et des corps flottants ; salure des eaux à l'embouchure des fleuves. — Nous avons dit plus haut que chaque goutte d'eau était arrêtée dans son mouvement vers la mer par l'ondulation de la marée pénétrant dans le fleuve, et qu'elle était ensuite repoussée et soulevée par les molécules qui la précédaient vers l'aval ; nous avons ajouté que la marée se propageait par le choc successif des molécules liquides, de telle sorte que ces molécules avaient une vitesse beaucoup moindre que celle de l'onde-marée et que chacune d'elles ne remontait le fleuve que sur une très-faible longueur. L'expérience prouve nettement ce que nous avons dit à ce sujet.

Des flotteurs ont été mis à l'embouchure de la Seine auprès du Havre. L'un d'eux a été lancé pendant une marée de vive-eau sur le banc de l'Éclat, et a remonté avec le flot jusqu'auprès du Hoc, un peu en amont de la pointe des Neiges; il s'est ensuite porté légèrement vers le Nord, et a repris sa course vers la mer avec le jusant.

Il est encore un fait bien connu de toutes les personnes

qui habitent auprès des rivières à marée, c'est que les corps flottants ne remontent qu'à une faible distance au moment du flot et redescendent bientôt avec le jusant. Ce fait se produit si communément que nous n'avons pas cru devoir faire faire des expériences spéciales pour le constater.

Des études faites sur la salure des eaux ont donné des résultats analogues.

On a soumis à l'analyse, au laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées, de l'eau puisée de basse mer sur plusieurs points entre le Havre et Quillebeuf. La quantité de chlorure de sodium contenue dans un litre d'eau prise auprès de ce dernier port, à 35 kilomètres de la mer, le 20 mars 1855, sur lendemain de syzygie, un quart d'heure avant la basse mer, n'était que 2 centigrammes, tandis qu'elle est de 29gr.80 dans l'eau de mer à Dieppe. Pendant un temps de crue, on a recueilli, au moment de la basse mer, de l'eau qui ne présentait aucune trace de chlorure, à 4 kilomètres en aval de Quillebeuf. Enfin de l'eau puisée un peu après la pleine mer, dans une grande marée et en temps d'étiage, à la Mailleraye, à 63 kilomètres du Havre, a fait voir qu'aucune goutte d'eau de mer ne pénètre jusqu'à ce point.

Le mouvement produit par les marées dans un fleuve entraîne non-seulement les molécules fluides de sa surface, mais la masse de ses eaux toute entière. Ce fait, qui paraît du reste évident de lui-même, a été constaté par l'expérience, durant des observations qui ont eu lieu au sujet du phénomène du mascaret et dont il a été rendu compte dans un autre travail.

Il semblerait en résulter que si l'on imaginait un diaphragme vertical mobile sur la Seine qui remontât le fleuve, en suivant le mouvement d'une goutte de ses eaux, les molécules situées à l'aval de ce diaphragme ne devraient guère se mêler avec celles de l'amont, et que les eaux salées et les eaux douces devraient être ainsi séparées par une ligne assez nette. Mais l'eau voisine du fond et des bords, qui a

moins de vitesse que celle du milieu de la rivière, cède plus aisément à l'impulsion du flot et remonte la première le cours du fleuve. Vers la fin du flot, les eaux du milieu de la rivière conservent plus longtemps leur mouvement ascensionnel. Ce motif et d'autres encore expliquent le mélange graduel des eaux de mer et des eaux douces.

Les hauts fonds augmentent les vitesses des courants de marée, et diminuent la hauteur des pleines mers en amont. — La masse totale des eaux du fleuve remontant vers l'amont avec les courants de flot, il est facile de voir ce que les hauts fonds doivent produire sur le mouvement des marées. Si l'on imagine, en effet, un canal d'une profondeur uniforme jusqu'à la mer, toute l'eau qu'il renfermera viendra contribuer à produire le gonflement des marées, et la masse des molécules prises sur une même section de ce canal se reportera tout entière vers l'amont. Mais si l'on suppose que l'on construise sur le fond de ce canal une cloison fixe qui le barre sur la moitié de sa profondeur à mer basse, la partie inférieure des eaux sera, sur une certaine longueur, arrêtée dans sa marche et ne pourra plus concourir à former l'ondulation au delà du barrage. Il s'ensuivra que la partie supérieure des eaux devra prendre une vitesse plus grande, et que l'ondulation, n'étant plus alimentée de la même manière, devra s'élever moins haut et s'affaisser en amont du barrage. De même, pendant la marée descendante la quantité d'eau qui doit être débitée par le fleuve passera par une section plus petite et aura par cela même plus de vitesse. Les hauts fouds doivent produire des résultats analogues.

On observe que c'est effectivement là ce qui se passe. La vitesse des courants augmente dans les parties qui correspondent aux hauts fonds, et le sommet de l'ondulation de la marée s'abaisse dans la partie supérieure du fleuve. De même, dans les rivières peu profondes, les courants de marée doivent avoir plus de vitesse et la mer doit atteindre

en amont un niveau moins élevé que dans les cours d'eau dont la profondeur est plus grande. La vitesse des eaux de marée doit aussi être beaucoup plus forte sur les grèves, telles que celles du mont Saint-Michel, que dans les fleuves à l'embouchure desquels la marée se produit dans les mêmes conditions.

Effet des barrages construits sur les rivières à marée.— On peut également voir quel est l'effet des barrages établis sur les rivières à marée. Ils suppriment toute la portion de l'onde qui se serait produite au-dessus de l'endroit où ils se trouvent. Les variations de niveau cessent en amont, et l'eau qui remontait le fleuve et qui en augmentait le débit pendant la marée descendante, ne peut plus refluer vers la source. Les chasses produites par le jusant diminuent, et des atterrissements ne tardent pas à se déposer auprès du barrage. Ces dépôts sont un nouvel obstacle au mouvement des marées. L'eau voisine du barrage ne peut ni le franchir, ni céder à la pression de celle qui arrive avec le flot. La quantité d'eau qui remonte le fleuve, à quelque distance en aval du barrage, est donc réduite. Les atterrissements qui en résultent tendent à en former plus loin d'autres qui diminuent encore la masse des eaux de marée et les chasses faites par le jusant. On voit bientôt apparaître des hauts fonds et des ensablements dans le lit du fleuve, et l'effet funeste du barrage se fait sentir à de grandes distances vers l'aval. Le débit diminue également en amont, pendant le jusant, de toute la quantité d'eau refoulée, et la section comme la profondeur du fleuve immédiatement au-dessus du barrage, deviennent bientôt aussi plus petites.

Quantité d'eau de marée qui remonte dans un fleuve et qui en descend. — Si l'on considère un point pris sur une rivière à marée, tel que Quillebeuf sur la Seine, et si l'on prend deux profils momentanés du fleuve, au milieu de l'étale de jusant et de l'étale de flot qui le suit, on obtien-

dra aisément le cube de l'eau qui aura remonté en face de ce point durant la période du flot. Il suffira pour cela de déduire de l'augmentation totale de volume accusée par ces deux profils, la quantité d'eau fournie pendant le même temps par le fleuve au point où il cesse d'être sujet aux marées. Ainsi, le 23 août 1856 (fig. 9), l'étale de jusant a eu lieu dans l'après-midi à Quillebeuf à 1^h 40′, et l'étale de flot à 5^h 30′. La quantité d'eau qui est entrée en Seine, pendant le même temps, en amont de ce port, est représentée par la surface comprise entre les deux profils correspondants depuis Quillebeuf jusqu'à leur intersection entre La Bouille et Rouen, diminuée de celles qu'ils laissent entre eux entre cette intersection et Pont-de-l'Arche, dont le pont formait encore, en 1856, un barrage dont la chute était rachetée par une écluse; ces deux surfaces doivent être multipliées par les largeurs correspondantes de la Seine pour donner le volume d'eau qu'elles représentent; la différence des deux produits indique la quantité d'eau totale dont a augmenté le volume de la Seine maritime en amont de Quillebeuf. Pour avoir ce qu'a fourni la marée, ou ce qui a remonté la rivière en face de ce port, il ne reste plus qu'à déduire de cette quantité d'eau totale le volume provenu de la Seine fluviale mesuré en amont de la partie sujette aux marées.

De même, pour savoir quelle est la quantité d'eau qui a descendu la Seine, il faut prendre les profils momentanés de ce fleuve à l'instant de l'étale de flot et de l'étale de jusant qui le suit. L'abaissement indiqué par ces deux profils au-dessus de Quillebeuf, moins l'exhaussement de la partie amont du fleuve, donne la quantité d'eau dont le volume du fleuve a diminué. En ajoutant à ce cube celui qu'a pu fournir la partie du fleuve non sujette aux marées, on a le débit total en face de Quillebeuf, pendant le jusant que l'on a considéré.

Si l'on désigne par V le volume d'eau qui a descendu la

Seine en face de Quillebeuf, entre les étales de flot et de jusant, par S la surface comprise entre les deux courbes et correspondant à un abaissement, par s la surface analogue qui répond à un exhaussement, par L et l les largeurs moyennes de la Seine relatives à chacune de ces surfaces, et enfin par v le volume fourni par la Seine pendant le même espace de temps, on aura :

$$V = SL - sl + v.$$

Il est facile de voir que si l'on considère la période du flot et si l'on désigne encore par S la surface qui correspond à un abaissement et par s celle qui répond à un exhaussement, on aura de même, d'après ce qui a été expliqué tout à l'heure : $V = sl - SL - v$, ou en changeant les signes :

$$-V = SL - sl + v.$$

La même formnle peut donc servir en convenant que, le volume V indiquera de l'eau sortie, quand il sera positif et de l'eau entrée, quand il sera négatif, ce qui paraît d'ailleurs assez naturel.

Si l'on veut avoir plus d'exactitude et tenir compte des différentes largeurs du fleuve, il suffit d'y prendre une série de profils et de calculer les volumes correspondants à chacun d'eux. On aura ainsi la formule

$$V = SL + S'L' + S''L''' + \ldots - sl - s'l' - s''l'' - \ldots + v.$$

Ce qui vient d'être dit pour la quantité d'eau qui entre ou qui sort en face de Quillebeuf, entre deux étales, peut également se dire de ce qui monte ou descend sur un point quelconque entre deux instants compris l'un et l'autre entre deux étales consécutifs. Ainsi, en prenant deux profils momentanés de la Seine entre l'étale de jusant et celui de flot, à Villequier, par exemple, on peut calculer la quantité d'eau montée devant ce port entre les moments

auxquels correspondent les profils que l'on a choisis. La même formule peut d'ailleurs servir, en donnant aux lettres qui y figurent la même signification qu'on leur a déjà donnée.

Pour avoir les quantités d'eau qui ont passé sur un point entre deux instants comprenant un étale de flot ou de jusant, il faut partager l'opération en deux autres en se servant du profil momentané qui répond à l'étale intermédiaire. On aura ainsi l'eau écoulée entre le premier instant et l'étale, et celle qui a passé depuis l'étale jusqu'au dernier instant considéré (1).

Si l'on voulait calculer, avec la formule ci-dessus, les quantités d'eau entrées de quart d'heure en quart d'heure ou de cinq en cinq minutes dans la Seine, au moyen d'observations faites simultanément aux différentes échelles hydrométriques et à des intervalles pareils, la quantité v pourrait avoir des valeurs différentes si le niveau du fleuve venait à varier en amont. On prendrait alors pour chaque intervalle de temps la valeur moyenne de v qui lui serait relative. Elle serait fournie par des études faites préalablement dans la partie purement fluviale de la rivière, pour déterminer son débit en raison des hauteurs d'eau à une échelle hydrométrique donnée.

La formule que nous avons citée rend compte des différentes phases que la marée traverse entre deux basses mers consécutives. Ainsi, lorsque l'eau commence à monter, les exhaussements sl, $s'l'$, etc., forment, en général, un chiffre moindre que $SL + S'L' + \ldots + v$; la marée peut donc s'élever d'abord sans que V cesse d'être positif ou que le jusant

(1) La méthode que nous venons d'exposer a été aussi trouvée par M. Lechalas, ingénieur des ponts et chaussées, chargé du service de la basse Loire, à Nantes. Il nous a communiqué un rapport de lui, du 12 avril 1859, où elle est indiquée, et dont on trouvera une partie à la fin de ce travail (note B). Il a bien voulu nous donner aussi connaissance des courbes de débit qu'il avait imaginé de déduire de cette méthode.

cesse de couler. C'est ce qui explique le retard des étales de jusant sur les basses mers. Les quantités sl, $s'l'$, ... continuant à croître, il y a un moment où leur somme est égale à $SL + S'L' + \ldots + v$, et où V est nul ; c'est l'étale de jusant. V devient ensuite négatif et le courant de flot s'établit. Quand la marée est à son plein dans la partie aval du fleuve, l'abaissement et les quantités correspondantes SL, S' L',.. se trouvent en amont et généralement dans la partie extrême où les marées se font sentir. Il arrive alors, le plus souvent, que $SL + S'L' + \ldots + v$ est plus petit que $sl + s'l' + \ldots$, et que le courant de flot persiste après le moment du plein. C'est ce qui rend compte du retard des étales de flot sur les pleines mers. La marée descendant ensuite au point que l'on considère, il se forme un abaissement de ce côté, et quelques-unes des quantités SL, S'L', etc. répondent à un abaissement vers l'embouchure. Bientôt $SL + S'L' + \ldots + v$ devient égal à $sl + s'l' + \ldots$, V devient nul, et l'étale de flot se produit. La mer continuant à baisser en aval, V devient positif, et le jusant se reforme à son tour.

On observe, en suivant cette discussion, que, toutes choses égales d'ailleurs, les quantités $sl + s'l'$, et $SL + S'L' + \ldots + v$ arriveront d'autant plus vite à être égales que v sera plus petit. Le retard des étales de jusant sur les basses mers sera donc moindre en temps d'étiage qu'en temps de crue, et, dans ce dernier cas, les eaux continueront plus longtemps à couler vers l'aval après l'heure de la basse mer. Le retard des étales de flot sur les pleines mers sera plus petit en temps de crue, et l'eau commencera plus tôt à se diriger vers l'aval qu'en temps d'étiage.

Si l'on voulait savoir quelle est la quantité dont on diminuerait la masse d'eau de marée qui entre dans un fleuve en faisant un barrage sur un point où les courants ne changent pas de sens, il faudrait prendre en amont du point où doit être le barrage les profils momentanés qui correspondent à la pleine et à la basse mer sur ce point.

On conçoit en effet que la quantité d'eau indiquée par ces profils ne s'élève que par un ralentissement de sa vitesse. Elle se déverserait donc sur le barrage et occuperait en aval un espace qui réduirait d'autant l'apport des marées, qui ne pourraient plus l'arrêter en la faisant gonfler vers l'amont.

En prenant les profils momentanés d'un fleuve de quart d'heure en quart d'heure, on peut trouver les quantités d'eau qui ont passé sur un point pendant chaque quart d'heure. Il est facile d'en conclure les débits successifs du fleuve et de les représenter par des courbes, comme l'a fait M. l'ingénieur Lechalas.

Courbes des vitesses et des débits. — Nous avons ainsi calculé les débits de la Seine, à Villequier, pendant les deux marées des 18 et 23 août 1856, en vive et en morte-eau. Les hauteurs d'eau observées sur le même point ont été rapportées sur un tableau graphique (fig. 10 et 11). En prenant pour abscisses des longueurs proportionnelles au temps écoulé depuis le commencement des observations le même jour et pour ordonnées des longueurs proportionnelles aux hauteurs d'eau, l'on a d'abord tracé une courbe indiquant le mouvement de dénivellation de la marée à Villequier. On a élevé sur des abscisses qui répondent au milieu de chaque quart d'heure, des ordonnées proportionnelles soit aux débits, soit aux vitesses calculés par les formules ci-dessus. Les ordonnées relatives au jusant ont été mises au-dessous des abscisses, et celles relatives au flot ont été portées au-dessus. En réunissant les points ainsi déterminés, on a eu les courbes de vitesse et de débit de la Seine à Villequier les deux jours où les observations ont été faites. Les courbes des vitesses calculées diffèrent un peu de celles relevées directement parce que les premières donnent des vitesses moyennes et les secondes les vitesses maximum sur la ligne du thalweg.

Influence relative du jusant et du flot sur l'approfondisse-

ment des chenaux dans les rivières à marée. — Les courbes de débit montrent nettement combien l'influence du flot est faible par rapport à celle du jusant pour approfondir les rivières à marée. Le volume d'eau qui remonte le fleuve est beaucoup plus petit que celui qui en descend. Cela tient à ce que les eaux d'amont sont arrêtées et refoulées dans le lit de la rivière; le débit du jusant sur un point donné comprend, par suite, outre la quantité d'eau qui est remontée en face de ce point, le volume des eaux d'amont accumulées pendant la marée montante.

Le niveau des eaux de flot s'élève d'ailleurs très-rapidement et n'a qu'une action assez petite pour creuser le chenal. Le jusant dure plus longtemps que le flot, et il s'écoule en grande partie, surtout dans les rivières dont l'embouchure est obstruée par un delta ou par des sables, quand les eaux se sont déjà notablement abaissées. Les eaux du jusant, plus abondantes et agissant à un niveau inférieur, ont ainsi une action plus directe sur le lit du fleuve pour l'approfondir. Sur la Seine, la différence doit être moins sensible en amont de Tancarville qu'en aval de ce point, où les eaux couvrent promptement toute la baie au moment du flot, tandis que pendant le jusant, elles sont longtemps contenues et comme concentrées entre les bancs qui découvrent dès la première période de la marée descendante. Cette différence d'action a été observée par tous les marins qui fréquentent la baie de Seine, et ils admettent en principe que « c'est l'èbe qui fait le chenal. »

Variations périodiques des quantités d'eau entrées et sorties d'une rivière à marée. — Dans la formule $V = SL + S'L' + \ldots - sl - s'l' - \ldots + v$ la série $SL + S'L' + \ldots - sl - s'l' - \ldots$ indique la diminution ou l'augmentation de volume que l'on constate par des profils et pour le temps qu'on considère. Désignons-la par χ_1 pour le jusant et par $-\chi_2$ pour le flot. Soient V_1 et $-V_2$ les volumes sortis et entrés par une même section du fleuve prise vers son embouchure, entre

l'étale de flot et celui de jusant qui le suit, et entre le même étale de flot et celui de jusant qui le précède. Soient enfin v_1 et v_2 les volumes des eaux d'amont pendant les mêmes intervalles de temps. On aura :

$$V_1 = \chi_1 + v_1$$
$$-V_2 = -\chi_2 + v_2.$$

En ajoutant, on trouve :

$$V_1 - V_2 = \chi_1 - \chi_2 + v_1 + v_2.$$

Si l'on admet qu'en en amont de la section que l'on considère, l'état du fleuve soit identique au moment de deux étales de jusant consécutifs, la diminution de volume de la partie maritime du fleuve pendant le jusant aura été égale à son augmentation pendant le flot, et l'on aura $\chi_1 = \chi_2$ ou

$$V_1 - V_2 = v_1 + v_2.$$

La quantité d'eau V_1 qui sort du fleuve pendant le jusant diffère donc de celle V_2 qui entre pendant le flot de la quantité des eaux d'amont produites par la rivière entre deux étales de jusant consécutifs. L'écoulement de cette quantité d'eau se fait entièrement pendant le jusant, et son action pour nettoyer l'embouchure du fleuve en est beaucoup plus grande. Les chasses produites à l'embouchure des rivières par les eaux qu'elles fournissent, considérées isolément, sont donc bien plus puissantes quand la marée s'y propage que lorsqu'elles se jettent dans des mers à niveau constant.

Les quantités χ_1 et χ_2 ne sont généralement pas égales. On remarque que pendant les vives-eaux et jusque vers le jour de la plus haute marée, les basses mers descendent de moins en moins bas dans les parties amont des fleuves, et qu'elles s'abaissent au contraire davantage dans les parties aval. L'inverse a lieu en morte-eau. Il y a un point de passage où elles atteignent toujours le même niveau. Si l'on prend des profils en amont de ce point et si l'on y applique

les formules ci-dessus, la différence $\chi_1 - \chi_2$ sera négative entre la plus petite marée de quartier et la plus grande marée de syzygie, c'est-à-dire que la quantité d'eau entrée pendant cette période est plus grande que celle qui sort. Elle est ensuite plus petite et la quantité $\chi_1 - \chi_2$ devient positive jusqu'à la plus faible marée de la quadrature suivante.

Cette quantité prise en amont d'un point voisin de l'embouchure n'est donc généralement pas nulle, comme le suppose la formule $V_1 - V_2 = v_1 + v_2$, mais elle est très-petite et peut être considérée comme telle, surtout dans les marées voisines de celles de quadrature ou de syzygie. Sa valeur tantôt négative, tantôt positive, montre que le jusant emporte tantôt moins, tantôt plus d'eau que n'en fournit la partie amont du fleuve. Il s'établit ainsi une compensation, et la différence de débit du flot et du jusant finit par être égale au volume des eaux venues de la partie supérieure de la rivière.

On peut remarquer aussi que l'on a $\chi_1 - \chi_2 > 0$ et $V_1 - V_2 > v_1 + v_2$ entre la marée de syzygie et celle de quartier, et $\chi_1 - \chi_2 < 0$ et $V_1 - V_2 < v_1 + v_2$ entre la marée de quartier et celle de syzygie. Il s'ensuit que débit du jusant est plus grand dans la première période de temps que dans la seconde, et que c'est vers le déclin des marées que les courants de jusant doivent avoir le plus d'action pour modifier l'état des bancs à l'embouchure des fleuves.

Les considérations que nous venons de développer montrent que l'écoulement des eaux d'amont se faisant pendant le jusant, le cube d'eau débité par seconde est d'autant plus grand que la durée du jusant est plus courte. Les travaux qui auront pour résultat d'accroître la durée du flot et de diminuer celle du jusant, auront donc aussi pour effet d'augmenter le débit du jusant par seconde. Les crues qui anéantissent les courants de flot et qui étendent la période du jusant à toute la marée, répartissent le débit des eaux sur un temps plus long, et font ainsi que le volume d'eau

écoulé par seconde diffère moins de celui débité en temps d'étiage qu'il ne le ferait sans cette circonstance. Mais la durée du jusant en temps de crue augmente beaucoup son effet pour nettoyer les passes des embouchures.

Le point de passage dont nous avons parlé tout à l'heure ne se trouve pas toujours au même endroit d'un fleuve; il semble descendre vers l'aval en temps de crue, et remonter en temps d'étiage. Nous reviendrons sur ce fait en parlant des lieux géométriques des pleines et des basses mers.

Accroissement progressif des sections d'une rivière à marée en descendant vers son embouchure — Si l'on applique la méthode que nous avons indiquée plus haut aux points successifs d'une rivière à marée, on voit que la quantité d'eau qui passe sur chaque point va en augmentant de l'amont à l'aval. Le calcul fait pour les marées observées les 18 et 23 août 1856 sur la Seine donne les résultats suivants :

DÉSIGNATION DES POINTS DE LA SEINE.	DÉBITS TOTAUX PENDANT UNE MARÉE.			
	Vive-eau du 18 août 1856.		Morte-eau du 23 août 1856.	
	Flot.	Jusant.	Flot.	Jusant.
	mèt. c.	mèt. c.	mèt. c.	mèt. c.
Quillebeuf.	32 533 222.50	44 231 663.55	16 261 334.92	36 693 385.14
Villequier.	28 412 510.20	39 055 953.34	9 249 044.59	30 966 659.23
La Mailleraye.	23 939 986.52	32 374 279.46	7 253 704.65	27 948 502.56
Duclair.	20 998 168 50	31 235 017.82	5 306 621.42	22 936 663.76
La Bouille.	15 323 346.38	24 092 790.18	3 880 957.17	19 101 169.94
Rouen.	9 330 526.65	18 641 683.68	1 819 837.98	14 515 374.38
Elbeuf.	3 082 610.49	12 199 821.90	»	10 755 105.00

La quantité d'eau qui passe sur un point d'une rivière à marée s'accroît donc à mesure qu'on descend vers son embouchure. Sa section doit, en conséquence, augmenter de l'amont à l'aval, par le seul fait du mouvement des marées

qui s'y produit, au-dessous de la cote moyenne entre les pleines et les basses mers.

Dans les rivières où la différence de hauteur entre les pleines et les basses mers reste constante sur de grandes longueurs, ou même va en diminuant à mesure que l'on se rapproche de l'embouchure, comme cela a lieu sur la Gironde, les sections à mer basse doivent aller aussi en augmentant de l'amont vers l'aval par le seul effet des marées.

Calcul des vitesses moyennes dans une section d'une rivière à marée et de la largeur à lui donner dans le cas où l'on construit deux digues parallèlement à son cours. — Les débits d'un fleuve sur l'un de ses points étant connus de quart d'heure en quart d'heure, par exemple, au moyen de ses profils momentanés, il est facile d'avoir les vitesses moyennes qui correspondent à ces débits.

Il suffit de diviser le cube de l'eau passée durant chaque quart d'heure par la section du fleuve, en prenant la hauteur moyenne de l'eau pendant ce quart d'heure. On a calculé ainsi les vitesses moyennes à Villequier, les 18 et 23 août 1856. On en a déduit, comme nous l'avons dit plus haut, les courbes qui sont rapportées dans les planches jointes à ce travail (fig. 10 et 11).

On peut déterminer aisément par ce qui précède la largeur à donner à un fleuve que l'on veut renfermer entre deux digues longitudinales insubmersibles. On aura le débit moyen de ce fleuve au point que l'on voudra choisir par des profils momentanés, en prenant ceux qui correspondent aux étales de flot et de jusant, en vive-eau. On supposera une vitesse moyenne qui serait un peu inférieure à celle qui entraînerait les matériaux formant le fond de la rivière. Cette vitesse sera généralement indiquée par l'expérience. En divisant le débit moyen par la vitesse moyenne, on obtiendra la section du fleuve sur le point que l'on considère; cette section correspondra à une hauteur d'eau

moyenne entre celles qui se sont produites entre les étales de flot et de jusant de la marée que l'on aura prise. Il sera ensuite facile de trouver la largeur que l'on cherche, en divisant la section par la hauteur d'eau moyenne au-dessus de l'étiage augmentée de la profondeur moyenne que l'on veut avoir au-dessous du même niveau.

Les vitesses, qui dépendent de la résistance du fond, ne peuvent être connues que par l'expérience de chaque fleuve. Il convient, d'ailleurs, de prendre une marée de vive-eau, parce que la vitesse limite, qui entraînerait le fond, sera nécessairement plus grande que celle que l'on devrait avoir pendant une marée de ce genre; en prenant une vitesse un peu inférieure, comme nous l'avons dit, on devra vérifier que la vitesse limite ne sera pas dépassée au moment de la vitesse maximum du flot.

Si l'on avait les débits de quart d'heure en quart d'heure, on pourrait calculer la section du fleuve, en prenant le moment du plus grand débit et une vitesse presque égale à la vitesse limite dont nous venons de parler plus haut. On aurait ainsi tout de suite la section cherchée, sans avoir besoin d'une vérification.

Propagation des marées dans les fleuves en vive et en morte-eau. — L'ondulation de la marée dont nous avons suivi plus haut la marche, présente des caractères différents quand elle a lieu en morte-eau ou en vive-eau, c'est-à-dire pendant les marées de quartier ou celles des pleines et nouvelles lunes.

Pour les étudier nous croyons qu'il vaut mieux prendre les observations qui ont été faites sur la Garonne et la Gironde, parce que les bancs qui existent à l'embouchure de la Seine modifient beaucoup le régime des marées dans ce fleuve.

On a relevé les hauteurs d'eau d'heure en heure sur la Garonne et la Gironde, et on les a rapportées sur un tableau graphique en prenant les heures pour abscisses et les hau-

teurs pour ordonnées, comme nous l'avons expliqué plus haut. Les observations sur divers points de la Garonne étant figurées sur le même tableau, il en résulte que l'ordonnée correspondante à une même heure donne plusieurs hauteurs différentes. Ainsi l'on trouve sur l'ordonnée qui se rapporte à midi, les hauteurs observées au même moment sur quinze points de la Garonne, depuis Castets jusqu'à l'embouchure. Il en résulte que les différences de longueurs de ces ordonnées indiquent les différences de niveau et les pentes entre les divers points à la même heure.

Cela posé, si l'on compare les courbes de vive et de morte-eau sur la Garonne (fig. 20 et 24), on observe aisément les différences qui suivent :

1° Sur un même point, l'eau monte beaucoup plus haut en vive-eau qu'en morte-eau ;

2° Elle descend beaucoup plus bas en vive-eau, vers l'embouchure du fleuve, mais moins bas, au contraire, dans la partie d'amont de la portion de la rivière qui est sujette aux marées. Il y a un endroit intermédiaire où les marées descendent toujours à peu près au même point ;

3° La marée s'élève et s'abaisse plus rapidement en vive-eau qu'en morte-eau ;

4° L'eau s'abaisse, tant en vive-eau qu'en morte-eau, plus lentement à mesure que l'on considère un point plus éloigné de l'embouchure ;

5° L'ondulation de la marée devient d'autant moins sensible que l'on s'éloigne davantage de la mer ;

6° Enfin, il y a un instant, qui est vers huit heures le jour de la plus grande marée de vive-eau, et vers une heure celui de la plus petite marée de morte-eau sur la Gironde, où le niveau du fleuve est à peu près le même sur tout son cours. Cette dernière loi est néanmoins sujette à beaucoup d'exceptions.

CHAPITRE II.

ÉTUDE DU RÉGIME DES MARÉES DANS LES FLEUVES.

Après avoir examiné d'une manière générale le mode de propagation des marées dans les fleuves et les conséquences immédiates qui en dérivent, nous allons étudier les diverses causes qui influent sur leur régime et les modifications qu'elles peuvent produire.

Principales causes qui agissent sur le mouvement des marées. — Plusieurs causes principales agissent sur le mouvement des marées dans les fleuves : ce sont la position de la lune et du soleil par rapport à la terre, la direction et l'intensité du vent, la pression du baromètre et l'état de crue ou d'étiage des eaux de la rivière elle-même.

Nous croyons inutile de nous étendre sur l'action du soleil et de la lune sur les marées ; nous rappellerons seulement que la hauteur à laquelle elles s'élèvent dépend de leur position, et surtout de celle de la lune par rapport à notre globe.

Les marées de vive et de morte-eau diffèrent les unes des autres et peuvent être plus ou moins grandes suivant la position des astres. On a pris la moyenne des hauteurs d'un grand nombre des plus hautes marées de vive-eau sur plusieurs points de nos côtes, et l'on a ainsi obtenu la quantité moyenne dont elles s'élèvent sur chacun d'eux au-dessus des basses mers correspondantes. On a appelé la moitié de cette quantité, *unité de hauteur*. Cette unité de hauteur, qui varie suivant les circonstances locales, est, d'après M. l'ingénieur hydrographe Daussy, de $3^m.79$ au Havre. de $3^m.21$ à Brest et de $2^m.64$ à Saint-Nazaire. L'amplitude moyenne de l'oscillation à la marée est donc de $7^m.58$ à l'embouchure de la Seine, et de $5^m.28$ à celle de la Loire,

dans les marées de vive-eau les plus voisines de la trente-sixième heure après la sygyzie.

L'Annuaire du bureau des longitudes et presque tous les almanachs indiquent chaque année les coefficients par lesquels il faut multiplier l'unité de hauteur dans chaque port pour avoir la demi-hauteur que la marée doit y atteindre au-dessus de la basse mer, à toutes les époques des pleines et nouvelles lunes. Ces coefficients sont connus à l'avance pour les marées de chaque jour, en raison de la position relative du soleil et de la lune par rapport à la terre, et ils correspondent, pour ainsi dire, à l'intensité de leur action. Ils varient de 0.20 en morte-eau à 1.17 en vive-eau. Ainsi, pour connaître la demi-hauteur dont la marée s'élèvera au-dessus de la basse mer au Havre, dans la plus grande marée qui suivra le 20 août 1861, il faut multiplier l'unité de hauteur au Havre (3.79) par le coefficient indiqué pour cette marée par les almanachs, soit par 0.91. On trouve de la sorte que cette demi-hauteur est de $3^{m}.45$, et par conséquent que la pleine mer s'élèvera à 6.90 au-dessus de la basse mer dans la marée qui sera la plus voisine de la 36e heure après la nouvelle lune du 20 août 1861. Cette méthode ne fournit toutefois que des approximations, et le chiffre de 3.79 donné par M. Daussy paraît un peu trop fort.

Les marées diminuent depuis la marée de syzygie jusqu'à celle de quadrature, et augmentent ensuite jusqu'à la marée de syzygie suivante, les marées de syzygie et de quadrature étant les plus voisines de la 36e heure après l'instant de la pleine ou de la nouvelle lune ou du quartier. L'amplitude de l'ondulation d'une marée dépend donc essentiellement de l'époque de la lunaison ou de l'âge de la lune le jour que l'on considère.

Le mouvement des marées peut être également influencé par la hauteur du baromètre. Une table qui figure tous les ans dans l'Annuaire des marées donne les quantités qu'il

faut retrancher des hauteurs prévues par le calcul, en raison des indications barométriques. Ces quantités varient de zéro à $0^m.27$ quand les hauteurs du baromètre s'élèvent de $0^m.760$ à $0^m.780$. Au-dessous de $0^m.760$ les différences seraient à ajouter ; mais elles ne sont pas fournies par les tables, et on les néglige ordinairement.

Le vent agit à la fois sur la hauteur des marées à l'embouchure et dans la partie maritime des fleuves ; mais il n'a une action sensible que lorsqu'il est fort ou qu'il a soufflé longtemps dans la même direction.

Le coefficient d'une marée, l'âge de la lune et la hauteur du baromètre, sont, avec la direction et l'intensité du vent, ce qui détermine la hauteur de cette marée sur les côtes de la mer. Pour en étudier la propagation dans un fleuve, on compare l'ondulation qu'elle produit sur différents points à celle qu'elle forme à son embouchure.

Le mouvement des marées dans les fleuves est modifié par la quantité des eaux d'amont. Suivant que le fleuve est en état de crue ou d'étiage, les marées y atteignent un niveau plus ou moins élevé, s'y font sentir plus ou moins loin, et le point où le sens des courants se renverse vers l'amont se rapproche ou s'éloigne de la mer. Il importe donc de distinguer, dans cette étude, les cas de crue et les cas d'étiage.

Comme les marées de vive-eau diffèrent beaucoup de celles de morte-eau, on examine ordinairement les plus grandes marées de vive-eau et les plus petites marées de morte-eau. Celles qui se produisent dans l'intervalle ne donnent lieu qu'à des faits intermédiaires et de même nature.

Profils momentanés. — Dans le premier chapitre de ce travail, nous avons suivi le mouvement d'une marée sur la Seine pendant un étiage et en morte-eau. Mais la marche et la forme des ondulations de la marée varient selon qu'elles se propagent dans un fleuve dont l'embouchure est libre et qui présente une grande profondeur sur un

long parcours, ou sur une rivière dont l'embouchure est encombrée par les sables ou qui n'offre partout qu'une quantité d'eau minime. La Gironde, qui n'a pas moins de 10 mètres de profondeur sur les points les plus élevés entre Royan et la pleine mer et où l'on trouve beaucoup d'eau sur une grande longueur, peut être prise pour exemple du premier cas, tandis que la Seine, avec l'immense déversoir formé par les sables de la baie où elle se jette, est un bon exemple du second. Examinons donc les profils momentanés qui donnent les mouvements de la marée sur ces deux fleuves.

En vive-eau : 1° *Pendant les étiages.* — Prenons les observations faites sur la Garonne et la Gironde le 6 septembre 1846, et sur la Seine le 18 août 1856 (fig. 12 et 13).

Le 6 septembre 1846, le coefficient de la vive-eau était 1.14, et le 7 (1), la Garonne était à la cote 0.76 à l'échelle de Castets, ou à $0^{m}.76$ au-dessus de l'étiage.

Le 18 août 1856, le coefficient de la marée était 1.01 et la Seine était à 0.15 au-dessus de l'étiage à Mantes.

Les profils momentanés à l'instant des basses mers, au Verdon et au Havre, montrent que la Garonne offre alors une pente uniforme sur 107 kilomètres depuis Quinsac jusqu'à la mer, tandis que la Seine s'incline rapidement en aval de Quillebeuf ; elle descend sur le déversoir des bancs de son embouchure et s'y abaisse de $4^{m}.48$ sur 40 kilomètres seulement. Ce seul profil suffit pour faire voir que les sables de l'embouchure de la Seine forment comme un long barrage à l'entrée de ce fleuve et empêchent les marées de descendre librement au niveau des basses mers du large.

Si l'on suit la marche de la marée à l'embouchure de ces deux fleuves, on voit que, sur la Seine (fig. 13), elle gravit lentement le seuil des bancs de la baie entre le

(1) Nous n'avons pas la cote du 6 septembre 1846 à Castets, mais elle ne peut pas différer de beaucoup de celle du 7.

Havre et Tancarville. Elle présente une forme très-arrondie vers l'amont, et des observations faites le même jour, entre Tancarville et le Hode, montrent que l'ondulation de la marée y a été précédée d'un violent mascaret. Le sommet de l'onde a atteint un niveau plus élevé à Tancarville qu'au Havre. Au moment où la marée montante parvenait à Quillebeuf, le profil momentané de la Seine était celui qui est indiqué par la figure. A cet instant, la différence du niveau des eaux était de $2^m.52$ entre cette ville et le Havre. Entre les deux mêmes points, la marée ne s'était avancée que de 39,500 mètres en $3^h\ 15'$, ou de $3^m.38$ par seconde. On conçoit, d'après le profil de la Seine à $9^h\ 45'$, que la masse d'eau qui arrivait à Quillebeuf devait tomber avec violence dans la partie profonde qui est au-dessus de ce port et rouler, en formant un mascaret, sur les hauts fonds qu'elle rencontrait dans la Seine.

Dans la Gironde (fig. 12) l'ondulation de la marée pénètre aisément. Elle offre une forme beaucoup plus allongée que sur la Seine. Elle parcourt la distance de 48 kilomètres qui sépare le Verdon de Pauillac en $2^h\ 21'$ avec une vitesse de $5^m.67$ par seconde. Elle ne prend une forme plus inclinée vers l'amont qu'à Blaye, où se trouvent des îles qui s'opposent à son libre cours. Cette ondulation soulève plus doucement les molécules d'eau que sur la Seine. Elle ne donnerait pas lieu à un mascaret, si elle avait partout la même forme qu'entre le Verdon et Pauillac. Le mascaret se manifeste dans la partie supérieure de la Gironde, en aval du Bec-d'Ambès. En amont de ce point, la Garonne a une profondeur assez grande entre les traverses; la marée s'y propage aisément, et l'inclinaison du profil vers l'amont devient plus faible. Le mascaret ne s'y produit que rarement et ne se montre que dans la partie située en amont de Bordeaux. La Dordogne, où il se remarque le plus habituellement, offre des profondeurs moindres que la Garonne (fig. 6 et 7) ; l'ondulation doit y prendre une pente plus forte

vers l'amont, et sa portion antérieure doit déferler en produisant un mascaret.

Le 18 août 1856, sur la Seine, au-dessus du Duclair, l'onde-marée offrait, vers l'amont, des inclinaisons beaucoup moindres qu'à Quillebeuf. Aussi, pendant cette marée, le mascaret ne s'est-il pas produit dans cette partie de la Seine.

Sur la Garonne, la mer descend rapidement après le moment du plein, et l'eau présente une pente vers l'aval presque immédiatement après le moment de la pleine mer. Il est évident que les molécules d'eau situées sur un point doivent s'écouler vers l'Océan très-peu de temps après la pleine mer, et que l'étale de flot doit suivre de très-près l'heure du plein. On comprend donc que, dans certaines localités, on ait pu rendre le mot *étale* synonyme de celui de pleine mer; mais il y a là une confusion qui pourrait amener à de graves erreurs, comme le démontre l'exemple de la marée du 24 septembre 1860, que nous avons cité dans la première partie de ce travail.

Sur la Seine, la pente ne s'incline vers l'aval que longtemps après l'heure de la pleine mer. L'intervalle de temps qui sépare la pleine mer de l'étale de flot a atteint $3^h\ 5'$ le 18 août 1856. La durée de ce long intervalle pourrait tenir à ce que la mer reste pleine pendant près de 2 heures à l'embouchure de ce fleuve.

Au-dessus de Bordeaux, la marée gravit la pente que lui offre le cours de la Garonne. La forme arrondie de l'ondulation, entre Quinsac et Rions, au moment de la basse mer à la Garonnelle, rappelle les pentes de l'embouchure de la Seine entre Quillebeuf et le Havre. La vitesse de propagation de la marée de Langoiran à la Garonnelle n'est plus que de $2^m.037$ par seconde. Dans la partie supérieure de son cours, l'onde-marée s'accumule, et son sommet s'exhausse au-dessus de son niveau dans la partie inférieure du fleuve. Comme le dit si bien M. l'ingénieur en chef Pairier dans son mémoire sur l'amélioration de la Basse-

Garonne (1), « le flot semble alors, par un dernier effort, « s'élever sur le plan incliné que lui présente la rivière, « comme la lame sur le rivage de la mer. » L'ondulation qui se produit dans cette partie de la Garonne rappelle celle qui gravit les bancs de l'embouchure de la Seine : l'onde-marée a son sommet plus haut à Tancarville qu'au Havre; elle paraît aussi se relever, en vertu de l'impulsion qui l'anime, pour franchir la hauteur des bancs qu'elle rencontre dans la baie. Le mascaret se manifeste sur le devant de l'ondulation, dans la partie amont de la Garonne maritime, comme dans la baie de Seine.

Enfin, sur la Seine, la marée du 18 août 1856 a rencontré le barrage que formait encore alors le pont de Pont-de-l'Arche, auprès d'Elbeuf, et a refoulé les eaux dans le voisinage de ce pont en les soulevant et en changeant leur pente.

On peut conclure de cette comparaison que, lorsque l'ondulation de la marée trouve des hauts fonds, elle se propage plus lentement et elle offre vers l'amont une inclinaison plus forte. Elle peut, si cette inclinaison est assez grande, déferler sur les bancs et contre les obstacles, en produisant ainsi le phénomène du mascaret. Enfin, son sommet s'exhausse et elle se relève, en vertu de l'impulsion acquise, pour gravir les pentes inclinées qu'elle rencontre.

2° *En temps de crue.* — Des observations de vive-eau ont été faites en temps de crue sur la Gironde et la Garonne le 17 février 1847, et sur la Seine le 9 mars 1860 (fig. 14 et 15). Le 17 février 1847, la Garonne montait de $6^m.40$ à $7^m.58$ au-dessus de l'étiage à l'échelle de Castets, et le coefficient de la marée était 1.13. Le 9 mars 1860, la Seine était à $4^m.54$ au-dessus de l'étiage à l'échelle de Mantes et le coefficient de la marée était 1.17.

(1) Mémoire à l'appui de l'avant-projet dressé le 23 juillet 1849, pour l'amélioration des passes de la Basse-Garonne et de la partie supérieure de la Gironde, par M. Pairier, Ingénieur des Ponts et Chaussées.—Bordeaux, 1853 (p. 23).

Les profils en long, pris au moment des basses mers au Verdon et au Havre, font voir, comme en temps d'étiage, l'influence du déversoir formé par les bancs qui se trouvent à l'embouchure de la Seine. Les bancs présentent un obstacle à la propagation de l'ondulation de la marée dans ce fleuve et amènent la formation du mascaret qui s'y manifeste. Ce phénomène s'est formé, le 9 mars 1860, à Tancarville, à Quillebeuf et à Duclair. Il ne s'est pas produit à Rouen, mais la Seine s'y est élevée de $0^{m}.36$ en cinq minutes, après l'heure de la basse mer.

Enfin la vitesse de la propagation de l'onde-marée, le 9 mars 1860, est à peu près la même qu'en temps d'étiage.

L'ondulation de la marée devient beaucoup plus faible à partir d'un point qui est à Quinsac, sur la Garonne, et à Rouen, sur la Seine. Au delà, elle remonte rapidement la pente inclinée du fleuve. Sur la Seine, à Quillebeuf, l'étale de jusant a suivi presque immédiatement la basse mer, mais l'étale de flot n'y a commencé, au milieu du fleuve, qu'à 11^{h} 55. près d'une heure après la pleine mer. Le profil pris à cet instant, indique que la pente était inclinée sur ce point vers l'aval, de telle sorte que le courant de flot durait encore au milieu du fleuve, lorsque la surface de la Seine offrait une légère contre-pente. Ce fait paraît dû à la vitesse acquise par la masse des eaux qui était en mouvement.

La courbe des pleines mers fait voir que la marée s'est élevée dans le fond de la baie de Seine plus qu'au Havre, et qu'elle a ensuite atteint partout, en amont, un niveau plus élevé que sur ce dernier point. Sur la Gironde et la Garonne, l'onde-marée a été en s'exhaussant d'une manière presque uniforme depuis le Verdon jusqu'à Quinsac.

Profils momentanés de morte-eau : 1° en temps d'étiage.— Les profils momentanés pris sur la Garonne en morte-eau, le 2 octobre 1847 (fig. 16), font voir qu'en temps d'étiage, l'inclinaison de la partie amont de l'onde-marée qui pénètre dans la Gironde est extrêmement faible.

Cette inclinaison augmente un peu entre le Bec-d'Ambès et Bordeaux. Au delà de ce port, les pentes diminuent, puis l'ondulation semble se soulever pour remonter les dernières parties du fleuve où elle se manifeste. Un fait très-curieux se remarque immédiatement dans ces profils : c'est que le niveau de l'eau s'abaisse beaucoup plus à Bordeaux qu'à l'embouchure même de la Gironde. La différence a atteint 1m.19, le 2 octobre 1847. Le niveau des pleines mers descend moins vite en morte-eau qu'en vive-eau.

Sur la Seine, les profils momentanés du 23 août 1856 (fig. 17), montrent que les marées de morte-eau gravissent, comme en vive-eau, le long déversoir formé par les bancs de l'embouchure de ce fleuve. Les basses mers restent encore de 2m.98 plus hautes à Quillebeuf qu'au Havre. Au delà de Quillebeuf, la pente de la partie la plus amont de l'onde-marée est beaucoup plus faible qu'en vive-eau. L'ondulation est aussi beaucoup plus allongée vers l'amont. L'eau s'abaisse très-lentement vers l'aval, après le moment du plein, ce qui favorise la durée du courant de flot après l'heure de la pleine mer.

2° *En temps de crue.* — Sur la Garonne, on remarque (fig. 18) en temps de crue, que dans la partie la plus amont du fleuve, l'onde-marée ne se présente plus comme en étiage. L'eau est soulevée, mais la forme de l'ondulation disparaît. La différence de niveau de la pleine et de la basse mer, qui est à peu près la même qu'en temps d'étiage vers l'embouchure, devient beaucoup plus petite en amont. Enfin l'on observe sur la Gironde, que le point où les basses mers descendent le plus bas n'est plus à Bordeaux, mais en aval, du côté de Pauillac.

Sur la Seine (fig. 19), le mascaret ne se manifeste plus en morte-eau. La courbe des basses mers est relevée par la crue. Le sommet de l'ondulation de la marée remonte aussi la pente du fleuve. Enfin l'on remarque, comme sur la Garonne, que la différence de niveau de la pleine et de la

basse mer est beaucoup moindre dans la partie amont du fleuve qu'en temps d'étiage.

Courbes locales. — D'autres courbes vont nous donner de nouvelles indications sur les mouvements des marées dans les fleuves. Ces courbes ont été obtenues en prenant pour abscisses les heures et pour ordonnées les hauteurs des eaux sur un même point. Nous les désignerons sour le nom de *courbes locales*, parce qu'elles donnent une idée précise de la manière dont l'eau monte et descend dans l'endroit que l'on considère. Nous avons déjà eu l'occasion d'y jeter rapidement un coup d'œil dans le premier chapitre, au sujet de la propagation des marées dans les fleuves en vive et en morte-eau. Examinons-les plus attentivement.

Courbes locales de vive-eau : 1° En temps d'étiage. — Les courbes locales de vive-eau relevées, le 6 septembre 1846, sur la Garonne (fig. 20 et 20 *bis*) font voir que les marées montent et descendent de la même façon, ou que l'onde-marée se propage sans modification importante, sur 93 kilomètres, depuis le Verdon jusqu à Bordeaux.

La basse mer descend plus bas de $0^m.20$ à Pauillac qu'au Verdon, quoique le premier de ces ports soit à 48 kilomètres en amont de l'autre.

Les courbes analogues prises sur la Seine, le 18 août 1856 (fig. 21), font voir que dans les derniers moments, la marée ne s'abaisse que très-lentement à partir du Hode, parce qu'elle est retenue par les bancs qui l'arrêtent. On aperçoit aussi que lorsque les courants de flot arrivent sur un point, le niveau s'y exhausse subitement. L'eau s'est élevée au Hode de $2^m.60$ entre 9^h et 9^h 1/4. Ainsi les bancs et les obstacles qui se trouvent à l'embouchure de la Seine, modifient doublement la marche de la marée : ils font baisser très-lentement les eaux dans la dernière période de la marée descendante, et ils font qu'elles s'élèvent brusquement dès qu'elles commencent à monter. On se rend aisément compte de ce fait par la forme de la par-

tie la plus amont de l'onde qui pénètre en Seine (fig. 13).

Au-dessus de Bordeaux, le sommet de l'ondulation s'élève sur les pentes de la Gironde. L'exhaussement du fond y produit un effet analogue à celui qu'on observe sur la Seine. La marée s'y abaisse avec une grande lenteur. Mais elle ne semble pas s'y élever plus rapidement qu'en aval. Cela tient à ce que l'ondulation y arrive avec moins de hauteur qu'à l'embouchure de la Seine. Ainsi, la différence de niveau est de $2^{m}.61$ sur 28 kilomètres, entre Tancarville et le Havre, quand la marée arrive à Tancarville, et elle n'est que de $1^{m}.25$ sur la même longueur entre Bordeaux et Rions, quand l'ondulation parvient à ce dernier port.

L'on observe aussi, que la profondeur d'eau que la marée rencontre dans la partie amont de la Seine, fait qu'elle y monte plus longtemps qu'en aval. Ainsi, il n'y a que $1^{h}45'$ entre les heures de basse et de pleine mer sur la Seine à Quillebeuf, tandis qu'il y a 2^{h} 35′ à Rouen et 2^{h} 45′ à Elbeuf. Sur la Garonne, au contraire, où la marée rencontre moins d'eau en avançant vers l'amont, le niveau ne s'élève que 2^{h} 55′ à Cadillac, à 32 kilomètres en amont de Bordeaux, au lieu de 4^{h} 20′ comme dans ce dernier port. La forme de l'onde-marée accusée par les profils momentanés de ces deux fleuves indiquent aussi cette différence. Une plus grande profondeur d'eau amène donc une plus grande durée de la marée montante.

Enfin, l'on remarque que vers 7 heures sur la Garonne et vers 2 heures sur la Seine, la différence de niveau sur tous les points du fleuve est minime, et que les eaux sont presque partout à la même hauteur. Ce fait ne s'observe pas toujours sur les deux fleuves que nous examinons, et paraît ne pas se reproduire dans beaucoup d'autres rivières.

2° *En temps de crue.* — Les courbes locales observées sur la Garonne le 17 février 1847 (fig. 22) montrent que les marées qui se propageaient en temps d'étiage jusqu'à Castets, à 143,000 mètres de l'embouchure, sont presque

insensibles en temps de crue à Langon, à 116 kilomètres du même point. On voit en outre que l'intervalle qui sépare les heures de basse mer, depuis le Verdon jusqu'à Bordeaux, est plus grand qu'en temps d'étiage. La marée paraît trouver dans la vitesse des courants descendants du fleuve un obstacle qui ralentit sa marche, et lorsqu'elle a, pour ainsi dire, vaincu leur effort, elle s'exhausse plus vite qu'en étiage. Enfin l'onde remonte la pente que lui offre le fleuve à partir de Pauillac, comme elle s'élève en étiage sur les pentes qu'elle rencontre au-dessus de Bordeaux.

Dans la partie amont de la Garonne, la différence de niveau de l'eau sur deux points consécutifs augmente en temps de crue quand on est près du moment de la basse mer. Elle finit par devenir à peu près constante, c'est-à-dire que l'inclinaison du lit du fleuve imprime, quelque temps avant la mer basse, un régime régulier à l'écoulement des eaux. Leur pente semble être à peu près ce qu'elle serait si la rivière n'était point sujette à l'action des marées, mais la surface du fleuve s'abaisse parallèlement à elle-même sur une assez grande longueur. On voit aussi que les courbes locales d'étiage, entre Bordeaux et Castets, ont une inclinaison plus grande avant l'instant des basses mers à mesure qu'on descend la Garonne, et que, par conséquent, le niveau s'abaisse plus vite du côté de Bordeaux que vers Rions et Cadillac. En amont, les eaux sont moins éloignées du régime qu'elles auraient sans les marées, et elles se rapprochent progressivement de ce régime à mesure qu'on s'éloigne de la mer.

Les courbes locales observées sur la Seine le 9 mars 1860 (fig. 23), en temps de crue, montrent que les oscillations de la marée dans la partie amont du fleuve ont lieu à un niveau plus élevé et sont moindres qu'en étiage. L'intervalle entre les courbes est plus grand pendant la période de la marée descendante, pour les mêmes points, en temps de crue qu'en temps d'étiage, parce que la pente du fleuve est plus considérable. La partie inférieure des courbes fait voir

la pente énorme de la Seine entre Tancarville et la mer; elle a été de $4^m.52$ à l'heure de la basse mer au Havre.

Les courbes locales du 9 mars 1860 montrent d'une manière saillante l'influence qu'ont, sur la Seine, les deux ondulations de marée qui pénètrent dans la Manche par Calais et par Cherbourg et qui se propagent en sens inverse dans cette mer. La tenue du plein au Havre est produite par l'interférence de ces deux ondes. En suivant le sommet de la courbe locale du Havre, on voit que la première ondulation a formé un premier plein et que la marée commençait à descendre, lorsque la seconde est venue relever et maintenir le niveau de l'eau. On peut suivre aisément cette deuxième onde dans la Seine; son sommet se dessine très-nettement jusqu'à Duclair. On voit qu'elle se propage plus lèntement que la première onde. Le sommet de celle-ci a mis $2^h.20'$ pour parcourir 88 kilomètres du Havre à Duclair, tandis que le sommet de la deuxième a employé $3^h.50'$ à franchir le même espace.

Courbes locales de morte-eau; 1° *en temps d'étiage.* — Les courbes locales de morte-eau relevées en temps d'étiage le 2 octobre 1847 sur la Garonne et le 23 août 1856 sur la Seine (fig. 24, 24 *bis* et 25), donnent lieu à des remarques analogues à celles relatives aux courbes locales de vive-eau.

L'onde-marée se propage encore sur la Garonne sans autre modification que l'abaissement du niveau des basses mers depuis le Verdon jusqu'à Bordeaux. Ce niveau se relève ensuite promptement sur la pente de la Garonne en amont de ce port.

Sur la Seine, les eaux s'élèvent brusquement au moment où arrive l'ondulation de la marée. Elles s'abaissent avec lenteur, et les hauts fonds qu'elles rencontrent les soutiennent et les empêchent d'atteindre le niveau des basses mers à l'embouchure du fleuve. On voit de même, dans la partie la plus amont de la Garonne maritime, que

la marée est soutenue par les hauts fonds et qu'elle s'abaisse de plus en plus lentement en amont de Bordeaux. Quelque temps avant les basses mers, le fleuve prend partout une pente uniforme et se rapproche ainsi du régime qu'il aurait sans les marées.

2° *En temps de crue.* — Les courbes déduites des observations faites sur la Garonne le 24 février 1847 (fig. 26) montrent que le niveau des basses mers est soutenue par les crues au-dessus de Pauillac et qu'elles descendent beaucoup moins bas qu'en étiage. Auprès de ce port, elles s'élèvent sensiblement au même niveau. En amont du même point, le sommet de l'ondulation gravit la pente du fleuve. Les marées se font sentir à une distance beaucoup moindre de l'embouchure en temps de crue qu'en temps d'étiage.

Sur la Seine, les courbes locales de la morte-eau du 15 mars 1860 (fig. 27) font voir que la marée a monté sur tous les points avec une faible vitesse après l'heure de la basse mer. L'ondulation de la marée ne s'est pas reproduite au delà d'Elbeuf. La durée de la propagation de la basse mer depuis le Havre jusqu'à Elbeuf a été de 7^h 10', tandis qu'elle n'avait été que de 6^h 15' le 18 août 1856 en temps d'étiage. La différence de niveau sur deux points consécutifs vers le moment de la basse mer tend à devenir uniforme, et le régime du fleuve se rapproche de ce qu'il serait s'il ne subissait pas l'influence des marées.

Conclusions que l'on peut tirer des profils momentanés et des courbes locales. — De l'examen que nous venons de faire des profils momentanés et des courbes locales de la Garonne et de la Seine, nous croyons qu'on peut conclure ce qui suit :

1° Dans les fleuves où l'onde-marée ne trouve pas d'obstacles, elle se propage sans modifications sensibles sur de grandes longueurs depuis leur embouchure, tant en vive-eau qu'en morte-eau ;

2° Les hauts fonds arrêtent le mouvement des marées descendantes et font qu'elles s'abaissent avec lenteur, surtout dans la dernière période de leur mouvement ;

3° La pente du thalweg, quand elle a une influence sur celle des eaux, exhausse le niveau des basses mers, et l'ondulation de la marée montante semble se soulever pour franchir les hauts fonds ;

4° Les atterrissements accumulés à l'embouchure des fleuves, lorsqu'ils sont nombreux, comme sur la Seine, et qu'ils rendent le chenal très sinueux et sans profondeur, font que la marée monte très rapidement sur chaque point au moment où elle y arrive. La partie antérieure et amont de l'onde déferle alors dans les endroits peu profonds du cours d'eau, en produisant un mascaret ;

5° Enfin, dans les crues, le niveau des pleines et des basses mers s'élève sur la pente du fleuve que l'onde-marée remonte de l'aval à l'amont.

Hauteur à assigner aux digues longitudinales à établir le long des rivières à marée. — Les courbes locales permettent d'apprécier l'inconvénient des digues longitudinales qui ont été établies au niveau des mers basses sur quelques rivières à marée. La courbe locale relevée, par exemple, devant Quillebeuf le 18 août 1856 (fig. 21), fait voir qu'une digue dont le couronnement eût été à la côte de basse mer 100.44, eût été recouverte pendant toute la durée de la marée, et que les eaux du jusant se seraient écoulées en dehors du lit principal du fleuve, sans avoir un grand effet pour l'approfondir. Une digue élevée à la cote 100, n'eut concentré l'action de l'èbe sur le lit endigué de la Seine que pendant la dernière période de la marée descendante. Il est très-essentiel que l'effet des eaux de marée qui descendent de l'amont soit réuni, par des digues assez hautes, sur le lit navigable du fleuve. Il ne faut pas que leurs forces soient disséminées sur une largeur inutile, au lieu de faire une chasse puissante où cela serait nécessaire.

Pour que les courants de flot et de jusant soient dirigés suivant les mêmes lignes de thalweg, pour que le jusant ait tout son effet pour appronfondir les passes, nous croyons qu'il faut que des digues longitudinales, analogues à celles de la Seine, soient élevées au niveau des eaux au moment de l'étale de flot pendant les vives-eaux d'étiage. La totalité des courants d'èbe sera alors concentrée, en général, entre les digues.

Lieux géométriques des pleines et des basses mers.—Si l'on indique sur un profil en long de la Seine, le niveau de la pleine et de la basse mer sur un même point pendant la propagation d'une même marée et si l'on réunit tous les points analogues par des lignes continues, on obtiendra les lieux géométriques des pleines et des basses mers sur ce fleuve. Ces lieux géométriques sont, pour ainsi dire, des courbes enveloppes entre lesquelles oscille l'ondulation de la marée. Quelques-unes de ces courbes relevées sur la Seine, la Garonne et la Loire, sont jointes à ce travail et vont nous fournir de nouvelles indications sur le régime des marées dans les fleuves.

Examinons d'abord celles de la Seine (fig. de 28 à 31).

I. *Lieux géométriques des pleines et basses mers sur la Seine.*

Lieux géométriques des pleines et basses mers de vive-eau : 1° *en temps d'étiage.* — Dans les marées de vive-eau et lorsque la Seine est voisine de l'étiage, le niveau des pleines mers va en s'élevant du Havre à Tancarville et descend ensuite jusqu'à Duclair (fig. 28). L'inclinaison du lieu géométrique des pleines mers entre Duclair et Quillebeuf, est d'environ un centimètre par kilomètre. Les inclinaisons changent de sens au-dessus de Rouen, se relèvent vers l'amont et tendent à se rapprocher de celles de la partie de la Seine non sujette aux marées.

Le niveau des basses mers de vive-eau, dans les mêmes

circonstances, s'abaisse de Pont-de-l'Arche à la mer. La pente est plus forte entre Pont-de-l'Arche et Elbeuf qu'entre Rouen et Duclair. En aval de Quillebeuf, les eaux du fleuve suivent les passes qui existent entre les bancs de la baie de Seine et descendent rapidement le déversoir qu'ils forment à son embouchure.

2° *En temps de crue.* — En temps de crue (fig. 29), le niveau des pleines mers s'élève depuis le Havre jusqu'à Rouen. Le sommet de l'onde-marée s'exhausse en parcourant la Seine. La courbe des pleines mers offre une pente presque uniforme de Rouen à Quillebeuf, point où commençait la baie de Seine à l'époque où les courbes ont été prises.

Les lieux géométriques des basses mers présentent aussi une inclinaison presque constante en aval de Rouen. La hauteur de ces courbes varie avec l'intensité de la crue. On peut voir qu'au-dessous de Quillebeuf les différences de niveau des basses mers dues aux crues deviennent très-faibles, et que leur influence cesse complétement d'être appréciable en aval du Hode.

Lieux géométriques des pleines et basses mers de morte-eau ; 1° *dans les étiages.* — Quand la Seine est voisine de l'étiage, les courbes des pleines mers de morte-eau sont à peu près parallèles à celles de vive-eau (fig. 30). La hauteur des marées varie en raison du niveau qu'atteint la mer au Havre et du plus ou moins de hauteur de la rivière à Mantes.

Les lieux géométriques des basses mers de morte-eau présentent une inclinaison plus faible que celles de vive-eau, entre la Bouille et Quillebeuf. L'inverse a lieu dans la partie amont, voisine de Rouen.

2° *Dans les crues.* — Les courbes des pleines mers de morte-eau offrent en général dans les crues (fig. 31) une pente uniforme depuis Rouen jusqu'à Quillebeuf. Elles présentent au delà des irrégularités dues aux bancs qui encom-

brent la baie de Seine. La largeur de cette baie, qui varie de 4 à 10 kilomètres, ne permet pas aux crues de s'y manifester d'une manière sensible pendant les pleines mers.

Les lieux géométriques des basses mers présentent aussi une pente à peu près uniforme de Rouen à Villequier. Cette pente est un peu plus forte entre Villequier et Quillebeuf. L'influence des crues devient peu sensible en aval du Hode.

Il est à remarquer que, suivant la hauteur de la crue, les basses mers à Rouen peuvent se maintenir à un niveau supérieur à celui de certaines pleines mers. Ainsi, la basse mer de morte-eau du 27 décembre 1854, s'est tenue à $0^m.63$ au-dessus dn niveau atteint par la pleine mer du 11 juin 1856. La première correspondait à une crue de $5^m.97$ à Mantes, et la seconde à une crue de $4^m.43$ seulement. De même, dans la vive-eau du 26 janvier 1853, où la Seine était à Mantes à $6^m.64$ au-dessus de l'étiage, la basse mer est restée à $1^m.70$ en contre-haut de la pleine mer du 27 juin 1854. Celle-ci ne correspondait qu'à une crue de $3^m.08$ à Mantes.

On doit en conclure que si une cause quelconque venait à faire descendre le niveau des basses mers sur la Seine, les crues élèveraient les pleines mers à une hauteur moins grande, et la Seine maritime déborderait moins aisément à Rouen et en amont. Dans la partie inférieure, l'influence des crues est beaucoup moindre. L'abaissement du niveau des basses mers n'aurait donc une influence notable sur l'élévation des pleines mers en temps de crue que dans la partie amont du fleuve, qui est d'ailleurs la plus riche et la plus fréquemment inondée.

On observe enfin que les courbes des pleines mers se relèvent au-dessus des hauts fonds et dans la partie amont du fleuve. L'ondulation paraît s'exhausser pour remonter les pentes qu'elle rencontre. Elle s'élève, à Tancarville et à Quillebeuf, sur la partie la plus haute des bancs de l'em-

bouchure, ainsi que dans la portion de la Seine qui est au-dessus de Rouen et où le fleuve a le moins de profondeur et le plus de pente à mer basse.

II. — *Lieux géométriques des pleines et basses mers sur la Loire.*

Courbes de vive-eau; 1° en temps d'étiage. — Les lieux géométriques des pleines et basses mers sur la Loire indiquent des faits analogues à ceux qu'on observe sur la Seine.

En temps d'étiage (fig. 32) les pleines mers de vive-eau atteignent un niveau moins élevé à Nantes qu'à Paimbœuf. A partir du Pellerin, la courbe s'abaisse rapidement jusqu'à la Haute-Indre, par suite des obstacles que présente à la propagation des marées le rétrécissement du fleuve qui se trouve sur le premier de ces deux points. L'on remarque en effet (fig. 3) que dans cet endroit une digue relie la rive droite à l'île de la Liberté, et un épi s'avance de cette île dans la Loire, en réduisant du tiers la largeur du fleuve. Une autre digue, située en amont de l'île sur la rive gauche, rétrécit encore le lit de la rivière, qui n'a plus que la moitié de sa largeur primitive en face du Pellerin.

Le lieu géométrique des basses mers de la Loire offre une inclinaison beaucoup plus rapide que sur la Seine en amont de Quillebeuf, mais plus faible que dans la baie de Seine en aval de ce port. Cette différence tient à la largeur et au peu de profondeur de la Loire, dont les eaux sont soutenues suivant une certaine pente par l'inclinaison de son lit. Il paraît certain que dès que l'on aura créé à ce fleuve un lit profond entre Nantes et Paimbœuf, son niveau s'abaissera à Nantes ; les courbes de basse mer offriront probablement une inclinaison plus faible, et les marées descendront beaucoup plus bas dans ce dernier port qu'elles ne le font aujourd'hui.

2° *En temps de crue.* — Dans les crues (fig. 32), on voit l'ondulation de la marée qui remonte rapidement la surface inclinée de la Loire. Elle s'exhausse pour franchir l'obstacle qu'elle trouve auprès du Pellerin. Cet obstacle retient l'ondulation, qui s'affaisse entre le Pellerin et Couëron. Enfin, l'onde-marée remonte le fleuve, et devient quelquefois peu sensible à Nantes, dans les grandes crues.

Les lieux géométriques des basses mers de vive-eau de la Loire montrent la chute énorme qui existe entre Nantes et Paimbœuf pendant les hautes eaux.

On voit qu'à la Haute-Indre, et en amont, les basses mers s'élèvent plus pendant les grandes crues que les pleines mers en temps d'étiage. Sauf l'obstacle présenté par l'état du fleuve au Pellerin, et qui semble donner naissance à un ressaut dans certaines crues comme en étiage, les lieux géométriques des basses mers offrent une inclinaison à peu près uniforme entre Nantes et Paimbœuf. Enfin, sur ce dernier point, les crues ne produisent à mer basse qu'une élévation insignifiante et ne doivent être surtout sensibles que par l'augmentation de vitesse des courants, comme le montre l'inclinaison de la courbe des basses mers.

Courbes de morte-eau; 1° *en temps d'étiage.* — En morte-eau et pendant les étiages (fig. 33), le niveau des pleines mers s'exhausse pour franchir l'obstacle que la marée rencontre au Pellerin. Entre ce port et Couëron, le niveau s'abaisse et le plan de la Loire indique un élargissement du fleuve. L'ondulation de la marée remonte ensuite dans la partie amont de la Loire auprès de Nantes.

Les lieux géométriques des basses mers en étiage font voir que la pente du lit de la Loire est très-forte entre Nantes et la Haute-Indre. L'eau semble se relever et former un ressaut pour franchir l'obstacle du Pellerin. Les pentes de basse mer sont plus faibles en aval qu'en amont de la Haute-Indre. Les basses mers d'étiage descendent aussi moins bas à Paimbœuf en morte-eau, comme cela a lieu

sur les bords de la mer. L'inverse se remarque au Pellerin et en amont de ce port.

2° *En temps de crue.* — Dans les grandes crues, les marées de morte-eau cessent d'être sensibles à Nantes. Les digues du Pellerin produisent encore un exhaussement du niveau des basses mers. Enfin les crues n'élèvent pas beaucoup le niveau de la Loire à Paimbœuf, mais l'inclinaison de la courbe des basses mers montre que les courants doivent avoir, dans ce cas, une extrême rapidité.

III. — *Lieux géométriques des pleines et basses mers sur la Garonne et la Gironde.*

Pleines et basses mers de vive-eau ; 1° en temps d'étiage. — Les lieux géométriques des pleines mers de vive-eau sur la Garonne et la Gironde (fig. 34) offrent, en étiage, une ligne généralement horizontale depuis le Verdon jusqu'à Bordeaux. Les bancs et les îles qui rétrécissent le lit du fleuve entre Blaye et le Bec-d'Ambès, exhaussent un peu le niveau des pleines mers entre ces deux points. A partir de Bordeaux, les courbes s'élèvent un peu jusqu'à Mondiet et montent ensuite subitement entre Mondiet et Castets.

On voit par la forme des lieux géométriques des basses mers, que dans la partie amont de la Garonne maritime les pentes sont rapides quand la mer est basse à Bordeaux. Le sommet de l'ondulation de la marée en vive-eau remonte donc encore sur les plans inclinés qu'elle rencontre.

Les courbes des basses mers de vive-eau indiquent que vers le moment de la mer basse, les pentes de la Garonne deviennent d'autant moins fortes qu'ells s'éloignent davantage de l'amont.

Dans la Gironde, elles se relèvent en allant vers la mer, à partir de Pauillac, de telle sorte que l'eau baisse moins à l'embouchure de la Gironde qu'en face de ce port. D'après M. Chazallon, ce fait pourrait tenir à ce que les ordonnées

des diverses ondes diurnes, semi-diurnes, quart-diurnes, etc., dont la somme forme celle de la marée qu'on observe, doivent s'ajouter pendant les basses mers dans la Gironde, et non à l'embouchure de ce fleuve.

2° *En temps de crue.* — En temps de crue, l'influence de l'exhaussement des eaux d'amont cesse en aval de Pauillac. La courbe des basses mers de vive-eau s'élève rapidement au-dessus de ce port.

L'action des crues ne se fait sentir sur les pleines mers qu'à partir de Blaye. L'ondulation de la marée remonte les pentes inclinées du fleuve, et arrive jusqu'à la Garonnelle.

Lieux géométriques des pleines et basses mers de morte-eau; 1° en temps d'étiage. — En morte-eau et en étiage, le point le plus bas des lieux géométriques des basses mers est à Bordeaux. La mer y descend à un niveau inférieur de plus d'un mètre à celui qu'elle atteint au Verdon.

La courbe des pleines mers est presque partout horizontale ; elle se relève seulement dans la partie la plus amont où la marée se fasse sentir, et remonte le cours du fleuve.

2° *En temps de crue.* — En temps de crue, le niveau des basses mers de la Gironde et de la Garonne s'exhausse en amont de Pauillac, point en aval duquel la crue n'a plus d'action sensible sur le niveau des basses mers. C'est alors à Pauillac, et non plus à Bordeaux, que se trouve l'endroit où la mer descend le plus bas.

Le niveau des pleines mers de morte-eau n'est élevé par les crues qu'en amont de Bordeaux. L'ondulation se relève pour remonter le cours du fleuve.

Conclusions à tirer de l'examen des lieux géométriques des pleines et des basses mers. — Nous croyons que, de cet examen, on peut conclure ce qui suit :

1° Les pleines mers de vive et de morte-eau tendent à atteindre, dans les rivières à marée, un niveau uniforme pour chaque ondulation pendant les étiages. Elles s'exhaussent pour franchir les obstacles que la marée rencontre, et

pour s'élever sur les pentes de la partie du fleuve la plus éloignée de la mer. Pendant les crues, elles s'élèvent vers l'amont, en suivant une pente qui varie en raison de l'abondance des eaux du fleuve.

2° Les étranglements qui existent sur certains cours d'eau et les obstacles que rencontre la propagation des marées sur certains points, relèvent le niveau des pleines mers, et produisent un abaissement de ce niveau en amont.

Enfin, 3° les basses mers de vive et de morte-eau tendent à suivre les pentes naturelles du fleuve. Leur hauteur dépend de ses hauts fonds et de la loi du mouvement des ondes de la mer à son embouchure.

Nécessité de tenir compte de l'abaissement des basses mers en amont, dans les projets d'amélioration de l'embouchure des rivières à marée; avantages et inconvénients de cet abaissement. — Dans la Gironde et la Garonne, qui ne présentent pas de seuils ni de bancs qui altèrent le mouvement des marées, les basses mers descendent moins bas à l'embouchure qu'à Bordeaux pendant les mortes-eaux d'étiage, et qu'à Pauillac pendant les vives-eaux et pendant les crues. Il y aura donc toujours lieu de tenir sérieusement compte de l'abaissement des basses mers en amont, dans les projets d'enlèvement des seuils à l'embouchure des fleuves, et l'on ne peut prétendre, comme l'ont fait certains auteurs, que le mouvement des marées suffit pour empêcher l'abaissement des eaux à marée basse.

Cet abaissement a pour inconvénients de laisser à découvert les fondations des quais et des ponts, et de forcer à les consolider par de nouveaux ouvrages. Il diminue la quantité d'eau qui reste en amont sur les seuils, et il fait que des hauts fonds inconnus jusqu'alors présentent des obstacles à la navigation descendante. Mais ces seuils ne sont réellement à craindre que lorsqu'ils sont de nature à résister à l'action des courants. L'abaissement des mers basses que l'on obtient en améliorant l'embouchure d'une rivière,

en réduit d'abord la section, principalement sur les hauts fonds les plus voisins de la mer, et y rend la vitesse des courants plus grande. Ceux-ci entraînent les sables dont se compose le lit du fleuve et l'approfondissent. L'abaissement des seuils, et, en général, du lit du fleuve, se fait alors progressivement de l'aval à l'amont, et lorsque l'équilibre mobile qui existe entre la vitesse des eaux et la résistance du fond s'est enfin rétablie, la rivière retrouve, à mer basse, à peu près la profondeur qu'elle avait avant les travaux. Comme les pleines mers atteignent toujours la même hauteur, on gagne, en définitive, au moment du plein, une quantité d'eau qui équivaut environ à l'abaissement du niveau des basses mers.

Cet abaissement provenant de la disparition des obstacles qui s'opposaient au libre écoulement du fleuve à son embouchure, a d'ailleurs généralement pour effet de relever le niveau des pleines mers en amont durant les étiages, et y fait ainsi gagner une nouvelle profondeur d'eau. En temps de crue, l'abaissement des basses mers diminue la hauteur qu'atteignent les pleines mers, comme le démontrent les lieux géométriques que nous avons cités plus haut. Il en résulte que le régime des marées se régularise et que les rives de la partie amont du fleuve sont moins fréquemment inondées.

La quantité d'eau qui entre et qui sort à l'embouchure se trouve aussi notablement accrue, ce qui augmente beaucoup l'action des eaux du fleuve pour faire des chasses à son embouchure et pour l'améliorer.

L'abaissement des basses mers, sur un fleuve comme la Seine, aurait également pour conséquence d'augmenter le temps pendant lequel la mer s'élèverait sur un même point, puisque la marée montante n'aurait plus à gravir le long déversoir qui existe à son embouchure et se produirait beaucoup plus tôt en amont. Par suite, la marée resterait basse moins longtemps et monterait pendant un

temps plus long. Le peu de profondeur qui reste toujours sur les seuils à marée basse aurait donc moins d'inconvénients qu'aujourd'hui, et les courants de flot dureraient davantage, ce qui serait fort utile pour la navigation ascendante. Dans d'autres rivières, telles que la Loire, l'abaissement du niveau des basses mers rapprocherait, comme on le verra plus loin, l'étale du jusant du moment des basses mers, et hâterait ainsi le commencement des courants du flot en augmentant leur durée.

La limite du renversement des courants en temps de crue et d'étiage serait en outre éloignée de la mer, et sur une plus grande longueur du fleuve, on serait certain de pouvoir profiter, dans toutes les circonstances, du courant ascendant pour remonter vers l'amont.

L'augmentation de la quantité d'eau sur un point de la rivière au moment de la marée aurait une dernière conséquence. Dans la partie amont du fleuve, où les crues ont le plus d'influence sur son régime, les eaux d'amont se répandant sur une masse d'eau plus considérable, auraient aussi moins de puissance pour diminuer la vitesse du flot et pour augmenter celle du jusant. Les courants de jusant seraient donc moins rapides pendant les crues et ceux de flot auraient plus de vitesse. Cet effet serait, du reste, plus sensible en amont qu'auprès de l'embouchure où l'action des crues est plus faible.

En résumé les inconvénients qui résultent de l'abaissement du niveau des basses mers dans les rivières à marée nous paraissent minimes en comparaison des avantages qui en sont la conséquence. L'accroissement de la profondeur d'eau sur les hauts fonds au moment du plein et l'augmentation des chasses à l'embouchure du fleuve doivent compenser presque toujours, à elles seules, et bien au delà, toutes les dépenses pour les fondations des quais et des ponts qui peuvent en être la suite. Nous sommes donc d'avis que dans la rédaction des projets d'amélioration des ri-

vières à marée, il faut tâcher d'obtenir l'abaissement des basses mers par tous les moyens possibles.

Elargissement progressif à donner à l'embouchure d'un fleuve entre deux digues longitudinales. — On a proposé dans différentes circonstances d'élargir en entonnoir l'embouchure de la Seine en augmentant progressivement la distance des digues destinées à lui créer un lit régulier jusqu'à la mer. Ce qui a été dit dans le cours de ce travail permet d'apprécier le danger qu'il pourrait y avoir à faire cet élargissement trop rapide. La facilité avec laquelle l'eau entrerait dans la Seine n'exhausserait guère le niveau des pleines mers dans la partie amont, parce qu'une trop grande largeur du fleuve diminuerait sa profondeur, et donnerait naissance à des hauts fonds qui abaisseraient les pleines mers d'amont et annuleraient l'effet que l'élargissement serait destiné à produire. L'abaissement du niveau des basses mers dans la Seine serait réduit, ainsi que l'accroissement de profondeur au moment du plein qui en eût été la conséquence. Pour connaître l'élargissement à donner aux digues de la Seine, ou en général d'un cours d'eau à son embouchure, il faut fixer la profondeur qu'on veut y avoir à mer basse et calculer sa largeur avec les formules indiquées plus haut. Les vitesses qu'on fera entrer dans les calculs seront données par l'étude de celles du fleuve lui-même et par la résistance du fond à l'action des courants.

Retards des étales de jusant sur les basses mers. — Les courbes locales que nous avons citées plus haut nous paraissent de nature à expliquer le retard des étales de jusant sur les basses mers. Lorsque l'onde-marée, remontant le cours d'un fleuve, donne lieu à des courbes analogues à celles du 24 septembre 1860 (fig. 35), on voit qu'il doit y avoir un retard de ce genre. Ainsi les pentes entre le Courval et Quillebeuf, qui sont indiquées par la différence des ordonnées de ces deux points (fig. 35 et 36), diminuent à partir de l'instant de la basse mer à Quillebeuf, et la vitesse

du courant devient moindre entre ces deux mêmes points. Mais les eaux doivent se porter encore vers la mer jusqu'au moment où les courbes se rencontrent et où la Seine est de niveau. Le mouvement doit même persister quelque temps après dans le même sens, en vertu de la vitesse acquise. On a effectivement observé le 24 septembre 1860 que l'étale de jusant n'a commencé au milieu de la Seine à Quillebeuf que 1h 10′ après l'heure de la basse mer sur ce point.

Lorsque la marée s'élève plus brusquement, comme l'indique la figure 37, on voit que le retard de l'étale de jusant sur l'heure de la basse mer sera moindre. Si la marée se propageait d'une manière uniforme (fig. 38), les courbes étant semblables, le moment de l'étale se rapprocherait beaucoup de celui de la basse mer et finirait par se confondre avec lui.

Cette dernière observation fait voir que dans un cours d'eau où l'ondulation de la marée se propagerait d'une façon régulière et complétement uniforme, les heures de l'étale de jusant et de la basse mer devraient coïncider.

L'étude de la formule qui indique le volume d'eau qui passe sur l'un des points d'une rivière à marée pendant un temps donné nous a déjà fait voir que les retards des étales de jusant sur les basses mers sont plus grands en temps de crue qu'en temps d'étiage.

Pendant les crues, il arrive parfois, comme le 17 février 1847 sur la Garonne entre Bordeaux et Quinsac (fig. 39), qu'il n'y a plus d'étale de jusant, et que le courant d'èbe ne cesse pas de se produire. Le 17 février 1847, en vive-eau et pendant une crue de 7 mètres à l'échelle de Castets, le jusant a été seulement amorti à Bordeaux pendant 1h 40′, mais le courant n'a pas tourné. Le même fait se reproduit en amont avec des hauteurs moindres de la Garonne. Le point où il commence à se manifester est d'autant plus loin de Bordeaux que la rivière est plus près de l'étiage. A Castets et même à Langon, le gonflement de la marée ne

produit jamais de changement dans la direction des courants. A partir de La Garonnelle, le courant tourne dans les grandes marées, et cet effet est habituel pendant l'été à Cadillac et surtout à Rions : dans les crues, le courant de flot ne se fait sentir que beaucoup plus bas.

Dans le cas où le mascaret se manifeste sur la Seine sous la forme d'un rouleau d'eau, on ne remarque pas d'étale jusant et le courant se reporte tout à coup vers l'amont. Le courant qui suit immédiatement le mascaret s'avance avec beaucoup moins de rapidité que lui, et la vitesse du flot n'atteint son maximum qu'environ une demi-heure après le passage de ce phénomène.

Quand le mascaret se présente sous la forme d'ondulations qui parcourent la Seine, il y a déjà un court étale de jusant. Un flotteur de superficie placé sur la Seine près de Villequier, le 13 septembre 1855, et abandonné au courant du fleuve, s'est arrêté à la rencontre de l'onde du mascaret ; il est ensuite resté à peu près stationnaire pendant 2′ 10″ avant de reprendre une marche ascensionnelle vers l'amont. Un flotteur de fond placé en même temps ne s'est arrêté que 1′ 30″, et a commencé à remonter la Seine 40″ avant celui de la surface. On a remarqué que la vitesse des flotteurs avait diminué notablement quelque temps avant l'arrivée du mascaret. D'autres expériences ont donné des résultats analogues. On peut en conclure que ce phénomène agit sur les eaux du fleuve à une petite distance en amont du point où il se produit. La distance à laquelle son action a été appréciable pendant les expériences que nous venons de citer peut être estimée au plus à un kilomètre. On voit qu'il y a eu un temps d'arrêt, d'ailleurs fort court, entre les courants descendants et les courants ascendants, c'est-à-dire, un véritable étale de jusant. Cet étale a aussi eu lieu au fond du fleuve, mais il y a été plus court qu'au milieu de sa surface. La différence de durée de l'étale à la surface et au fond vient probablement de ce que les cou-

rants de superficie ont plus de vitesse et offrent une plus grande résistance à l'action du courant ascendant de la marée qui pénètre dans le fleuve. On remarque donc déjà, dans ce cas, un petit retard de la fin de l'étale de jusant sur la basse mer. Nous rappellerons, d'ailleurs, que le mascaret ne se manifeste ordinairement qu'en vive-eau et dans des circonstances particulières. Nous ne croyons pas devoir insister sur les détails qui accompagnent ce phénomène qui a été l'objet d'un travail spécial déjà publié.

Le retard de l'étale de jusant sur l'heure de la basse mer a été, à Villequier, de 55′ le 27 octobre 1857, lendemain de quartier, par une petite brise de S.-E., et les eaux n'étant l'avant-veille à Mantes qu'à $0^m.10$ au-dessus de l'étiage ordinaire. Ce retard a atteint souvent cette limite. Le 12 août 1860, troisième jour après quartier, par une petite brise N.-O, et la Seine étant l'avant-veille à Mantes à $0^m.30$ au-dessus de l'étiage ordinaire, le retard de l'étale de jusant sur la basse mer a été de $1^h.5'$ sur le même point, au milieu du fleuve.

Ces retards peuvent enfin être influencés par le vent. Il tend à les accroître quand il souffle avec force dans le sens du jusant, et à les réduire quand il souffle en sens contraire.

Retard des étales de flot sur les pleines mers. — Comme nous l'avons vu plus haut, l'heure de l'étale de flot ne coïncide pas avec celle de la pleine mer. L'intervalle qui les sépare atteint quelquefois plus de 3 heures sur la Seine. Ce fait s'explique par la forme même de l'ondulation de la marée dans ce fleuve. Les courbes locales du 18 août 1856 à la Mailleraye et à Villequier (fig. 21), et à Quillebeuf et Tancarville le 23 du même mois (fig. 40), en rendent compte d'une manière assez nette. On voit que la courbe de la Mailleraye reste au-dessous de celle de Villequier, longtemps après l'heure de la pleine mer sur chacun de ces points. Ce retard semblerait devoir cesser si le niveau de

la marée atteignait la même hauteur dans ces deux ports; mais l'observation prouve que le courant de flot continue toujours jusqu'à ce que les eaux du fleuve aient pris une légère inclinaison de l'amont vers l'aval.

Lorsque la différence de niveau des pleines mers est minime et que le sommet de l'onde-marée s'élève un peu en remontant vers l'amont, l'étale de flot coïncide avec la pleine mer. Il finit même par la précéder quand le niveau de la pleine mer s'élève très-rapidement vers l'amont du fleuve (fig. 41).

Les retards des étales de flot paraissent suivre les mêmes lois dans la Manche que dans la Seine. D'après M. l'ingénieur hydrographe Keller (1), la marée atteint, dans cette mer, deux hauteurs maxima et une hauteur minimum entre l'île d'Ouessant et Dunkerque. Les hauteurs maxima s'observent à l'ouest entre Start-Point et les Héaux de Bréhat, et à l'est, entre Beachy-Head et Cayeux. Le point de plus petite hauteur est entre Barfleur et Poole. Le lieu géométrique des pleines mers irait ainsi en s'abaissant depuis les Héaux jusqu'à Barfleur et depuis Cayeux jusqu'à Dunkerque, et s'élèverait depuis Ouessant jusqu'aux Héaux et depuis Barfleur jusqu'à Cayeux. D'après le même auteur, les retards des étales de flot sur les pleines mers sont ceux qui figurent dans le tableau suivant :

---

(1) *Exposé du régime des courants dans la Manche et la mer d'Allemagne*, etc., par M. Keller, ancien élève de l'École polytechnique, ingénieur hydrographe de la marine. Paris, 1855.

Tableau des retards des étales de flot sur les pleines mers.

CÔTE DE FRANCE.		CÔTE D'ANGLETERRE.	
LOCALITÉS.	RETARD de l'étale de flot sur la haute mer.	LOCALITÉS.	RETARD de l'étale de flot sur la haute mer.
		J. Scilly.	3h 0′
		C. Lezard.	3 30′
Ouessant.	2h 30′	Eddystone	4 0′
Les Héaux (*maximum*).	»	Start-Point (*maximum*).	4 30′
Les Casquets	3h 0′		
Cap la Hague.	4 0′	Portland-Bill.	5 0′
Cherbourg.	3 0′		
Barfleur (*minimum*). .	2 30′	Poole (*minimum*). . . .	»
Dive.	2 0′	Needles-Point.	2h 30′
Le Havre	1 40′	Portsmouth.	0 0′
Fécamp.	1 30′	Brighton.	0 30′
St-Valery et Dieppe. . .	1 20′		
Cayeux (*maximum*). . .	2 30′	Beachy-Head (*maximum*)	1 0′
Canche	3 0′	Douvres	3 30′
Boulogne	3 30′	Northforeland.	4 20′
Calais	4 20′	Le Varne.	4 40′
Dunkerque	5 0′	Goodwin.	5 15′
		Galloper..	6 30′

Or, d'après ce que nous avons exposé plus haut, les retards des étales de flot sur les pleines mers doivent être plus longs dans les parties où le sommet de la principale ondulation s'abaisse que dans celles où elle s'élève. Cette loi semble confirmée par le tableau que nous venons de citer. Les retards sont plus longs des Casquets à Barfleur et de Cayeux à Dunkerque, qu'ils ne le sont à Ouessant et entre Barfleur et Cayeux. Ils sont de même plus grands sur la côte anglaise entre Start-Point et Poole, et à l'Est de Beachy-Head qu'entre les îles Scilly et Eddystone, et Poole et Beachy-Head.

Le retard des étales de flot sur les pleines mers augmente et diminue suivant l'inclinaison du lieu géométrique des pleines mers. Sur la partie amont de la Seine maritime il

devient moindre et finit par disparaître dans les crues qui exhaussent le niveau du plein. La discussion de la formule qui donne les quantités d'eau que débite une rivière à marée a déjà fait voir que pendant les crues les retards des étales de flot sur les pleines mers deviennent moindres, résultat qui concorde avec ce que nous venons de dire.

Les étales de flot varient également avec d'autres causes. Ainsi, lorsque le vent d'Ouest souffle en repoussant les eaux de la Seine vers l'amont et empêche les eaux d'aval de se retirer et de descendre aussi vite, ils font durer les courants de flot, et les retards des étales sur les pleines mers sont un peu plus longs.

Enfin, dans les moments de crue (fig. 39), le courant se dirige sans discontinuité vers la mer, et il n'y a d'étale ni de flot ni de jusant.

Il en est de même dans la partie extrême où arrive l'ondulation de la marée, et où elle remonte la pente rapide que lui présentent les eaux du fleuve. C'est ainsi que l'on remarque que les étales de jusant et de flot ne se produisent jamais sur la Seine au-dessus de Pont-de-l'Arche pendant les plus hautes marées d'étiage, et qu'elles cessent de se manifester au-dessus de Villequier lorsque de grandes crues coïncident avec de faibles marées de morte-eau. Sur la Garonne, les étales, qui s'observent jusqu'à la Garonnelle dans les vives-eaux d'étiage, ne se produisent quelquefois pas un peu au-dessus du Bec-d'Ambès, dans les mortes-eaux qui ont lieu pendant de très-grandes crues.

Effet des élargissements et des rétrécissements sur les étales. — Lorsque, après un chenal étroit, la marée montante rencontre une partie plus large, l'ondulation s'affaisse et le niveau des pleines mers s'abaisse. L'inverse a lieu quand le chenal se rétrécit. Les élargissements ont donc pour effet de faire descendre le niveau des pleines mers, tandis que les rétrécissements tendent à l'exhausser.

Il en résulte, d'après ce que nous avons dit plus haut,

que le retard des étales de flot sur la pleine mer doit augmenter dans les élargissements et diminuer dans les rétrécissements. En supposant la vitesse du sommet de l'onde-marée uniforme, les étales de flot doivent donc marcher moins vite dans les élargissements et plus vite dans les rétrécissements. Cette loi, qui est vraie pour le cas où les pleines mers tendraient à atteindre partout une même hauteur dans un chenal régulier, est modifiée lorsqu'une cause la fait arriver à des hauteurs diverses. Dans ce cas les vitesses de propagation des étales de flot sont ou diminuées par les élargissements ou accélérées par les étranglements par rapport à ce qu'elles eussent été sans ces circonstances. Ce que nous venons de dire suppose d'ailleurs que la profondeur reste assez grande pour ne pas avoir d'action sur le niveau des pleines mers. Enfin cette loi n'est vraie que pour une seule ondulation, et elle serait modifiée ou même renversée si l'on considérait un chenal en mer recevant plusieurs ondulations. C'est ce qui arrive dans la Manche.

Lorsqu'un élargissement succède à une partie plus étroite et que la profondeur n'est pas sensiblement diminuée, la pente de l'eau pendant le jusant devient moindre, et le retard de l'étale de jusant sur la basse-mer diminue.

Dans les rétrécissements, la pente devient plus grande et le retard des étales de jusant sur les basses mers augmente. En supposant la vitesse de propagation des basses mers uniforme, les élargissements auront donc pour effet d'accélérer la marche des étales de jusant en les rapprochant des basses mers, et les rétrécissements de la ralentir en les en éloignant. Mais cette loi suppose aussi qu'il n'y ait pas de modification dans les profondeurs de l'eau qui soit capable d'influer sur les pentes à mer basse. C'est, du reste, de l'inclinaison du lieu géométrique des pleines et des basses mers que dépendent les progressions des étales de flot et de jusant ; les causes qui modifient ces pentes amènent des changements correspondants dans les étales.

Action du vent sur les étales. — L'action du vent sur les étales, dont nous avons déjà dit quelques mots, est extrêmement sensible. En pleine mer, les vents alisés impriment à l'eau une vitesse de $0^m.21$ par seconde à sa surface. Des vents qui auraient une action analogue sur la Seine et qui souffleraient d'amont, prolongeraient la durée du jusant jusqu'au moment où les courants de flot auraient eu une vitesse de $0^m.21$ par seconde en temps de calme, et arrêteraient les courants de flot quand ils auraient encore eu sans cela cette même vitesse. Les vents d'amont ont donc pour effet de retarder les étales de jusant et d'avancer les étales de flot. Par une raison inverse, les vents d'aval avancent les étales de jusant et retardent les étales de flot. Ces effets doivent se produire en mer comme dans les fleuves.

Observations diverses sur les étales. — Sur la Seine, les étales de jusant durent de 2 à 15 minutes à Villequier et à peu près autant à Quillebeuf. Le commencement des étales de jusant n'a pas lieu en même temps au bord de la Seine et au milieu. Il en est de même de la fin de ces étales. Ils commencent et finissent plus tard au milieu du fleuve qu'auprès de ses rives.

Le changement des pentes, qui s'inclinent vers l'amont après l'étale de jusant, produit plus aisément un temps d'arrêt et un mouvement en sens inverse sur les bords qu'au milieu de la Seine. Ce fait nous paraît tenir à ce que la vitesse de jusant y est moindre à cause du frottement de l'eau sur le lit du fleuve. Les molécules liquides du milieu conservent plus longtemps leur mouvement primitif vers l'aval, probablement en vertu de leur vitesse acquise. La différence de temps entre la fin de l'étale de jusant sur les rives et au-dessus du thaleveg de la Seine, est parfois de trois quarts d'heure à Villequier. Il y a donc courant de flot le long des rives pendant une demi-heure au moins, tandis que le jusant continue à exister au milieu du fleuve.

Pendant les crues, on remarque quelquefois que le courant de flot se produit avec assez de vitesse sur les bords, tandis que le jusant ne cesse pas au milieu du fleuve pendant toute la période de la marée ascendante. Ce fait a été particulièrement observé sur la Seine, à Duclair et sur plusieurs autres points, en morte-eau.

Quant le mascaret se produit sur la Seine, il forme généralement en plan un arc de cercle convexe vers la mer, de telle sorte qu'il arrive plus tôt sur les bords qu'au milieu du fleuve. Cette différence semble tenir encore à la même cause, c'est-à-dire à ce que les molécules liquides voisines des rives ont moins de vitesse que celles du milieu, et cèdent plus tôt aux causes qui tendent à leur imprimer un mouvement vers l'amont.

La durée de l'étale de flot est très-variable, comme celle de l'étale de jusant. On peut dire qu'elle est en général de 10′ sur la Seine. Cet étale est quelquefois presque nul et parfois il dure 20′ et 25′.

Sur la Gironde, on a observé les étales de flot au Verdon, à Blaye et au Bec-d'Ambès. On a trouvé qu'ils duraient en moyenne 26′ au Verdon, 14′ à Blaye et 10′ au Bec-d'Ambès. Il semblerait résulter de ces observations que la durée de l'étale de flot diminue à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Il a été jusqu'ici impossible de vérifier cette loi sur la Seine, faute d'observations assez nombreuses.

On remarque que l'étale de flot commence et finit plus tôt sur les bords qu'au milieu de la Seine. Ce fait est analogue à celui que l'on observe pour les étales de jusant, et paraît dû à la même cause. La différence atteint quelquefois de trois à quatre heures. L'étale du jusant n'a fini au milieu de la Seine à Villequier, le 16 août 1860, que 3^h 36′ après avoir cessé d'exister aux bords du fleuve. La différence de la fin de l'étale de flot au bord et au milieu, sur le même point, a été de 4^h 5′ le 18 septembre de la même année. Dans ces circonstances les courants se dirigent pen-

dant plus de trois heures en sens inverses au milieu du fleuve et sur ses rives.

On a observé simultanément sur la Gironde, à Blaye et au Bec-d'Ambès, pendant quinze jours consécutifs, du 8 au 22 septembre 1845, les retards des étales de flot et de jusant sur les pleines et les basses mers, et les dénivellations de la marée pendant ces retards.

Les eaux de la Garonne étaient alors assez basses et ne pouvaient avoir que peu d'influence sur les résultats. On a trouvé pour la moyenne des temps :

A Blaye 33′ à la pleine mer et 36′ à la bassse mer.

Au Bec d'Ambès 27′ à la pleine mer et 23′ à la basse mer.

Et pour la moyenne de la dénivellation de la marée :

A Blaye, $0^m.18$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.52$ d'exhaussement à la basse mer.

Au Bec-d'Ambès, $0^m.20$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.47$ d'élévation à la basse mer.

Si l'on se reporte aux lieux géométriques des pleines et des basses mers sur la Gironde (fig. 34), on voit que les pleines mers s'élèvent de $0^m.18$ entre Blaye et le Bec-d'Ambès en vive-eau, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.06$ à $0^m.07$ en morte-eau entre les mêmes points ; elles sont donc en moyenne plus hautes au Bec-d'Ambès qu'à Blaye, et, d'après ce que nous avons dit au sujet des retards des étales de flot sur les pleines mers, l'étale de flot devrait suivre presque immédiatement le moment du plein. Le retard que l'on observe est moindre de deux heures environ que sur la Seine, et nous semble devoir être attribué à la vitesse acquise par les molécules liquides pendant le flot.

Les courbes de basse-mer de la Gironde montrent aussi que la mer descend de $0^m.10$ plus bas au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les mortes-eaux, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.15$ à $0^m.20$ de moins au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les vives-eaux. En somme, elle descend donc plus sur le second point que sur le premier, ce qui explique

Pendant les crues, on remarque quelquefois que le courant de flot se produit avec assez de vitesse sur les bords, tandis que le jusant ne cesse pas au milieu du fleuve pendant toute la période de la marée ascendante. Ce fait a été particulièrement observé sur la Seine, à Duclair et sur plusieurs autres points, en morte-eau.

Quant le mascaret se produit sur la Seine, il forme généralement en plan un arc de cercle convexe vers la mer, de telle sorte qu'il arrive plus tôt sur les bords qu'au milieu du fleuve. Cette différence semble tenir encore à la même cause, c'est-à-dire à ce que les molécules liquides voisines des rives ont moins de vitesse que celles du milieu, et cèdent plus tôt aux causes qui tendent à leur imprimer un mouvement vers l'amont.

La durée de l'étale de flot est très-variable, comme celle de l'étale de jusant. On peut dire qu'elle est en général de 10′ sur la Seine. Cet étale est quelquefois presque nul et parfois il dure 20′ et 25′.

Sur la Gironde, on a observé les étales de flot au Verdon, à Blaye et au Bec-d'Ambès. On a trouvé qu'ils duraient en moyenne 26′ au Verdon, 14′ à Blaye et 10′ au Bec-d'Ambès. Il semblerait résulter de ces observations que la durée de l'étale de flot diminue à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Il a été jusqu'ici impossible de vérifier cette loi sur la Seine, faute d'observations assez nombreuses.

On remarque que l'étale de flot commence et finit plus tôt sur les bords qu'au milieu de la Seine. Ce fait est analogue à celui que l'on observe pour les étales de jusant, et paraît dû à la même cause. La différence atteint quelquefois de trois à quatre heures. L'étale du jusant n'a fini au milieu de la Seine à Villequier, le 16 août 1860, que 3^h 36′ après avoir cessé d'exister aux bords du fleuve. La différence de la fin de l'étale de flot au bord et au milieu, sur le même point, a été de 4^h 5′ le 18 septembre de la même année. Dans ces circonstances les courants se dirigent pen-

dant plus de trois heures en sens inverses au milieu du fleuve et sur ses rives.

On a observé simultanément sur la Gironde, à Blaye et au Bec-d'Ambès, pendant quinze jours consécutifs, du 8 au 22 septembre 1845, les retards des étales de flot et de jusant sur les pleines et les basses mers, et les dénivellations de la marée pendant ces retards.

Les eaux de la Garonne étaient alors assez basses et ne pouvaient avoir que peu d'influence sur les résultats. On a trouvé pour la moyenne des temps :

A Blaye 33′ à la pleine mer et 36′ à la bassse mer.

Au Bec d'Ambès 27′ à la pleine mer et 23′ à la basse mer.

Et pour la moyenne de la dénivellation de la marée :

A Blaye, $0^m.18$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.52$ d'exhaussement à la basse mer.

Au Bec-d'Ambès, $0^m.20$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.47$ d'élévation à la basse mer.

Si l'on se reporte aux lieux géométriques des pleines et des basses mers sur la Gironde (fig. 34), on voit que les pleines mers s'élèvent de $0^m.18$ entre Blaye et le Bec-d'Ambès en vive-eau, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.06$ à $0^m.07$ en morte-eau entre les mêmes points ; elles sont donc en moyenne plus hautes au Bec-d'Ambès qu'à Blaye, et, d'après ce que nous avons dit au sujet des retards des étales de flot sur les pleines mers, l'étale de flot devrait suivre presque immédiatement le moment du plein. Le retard que l'on observe est moindre de deux heures environ que sur la Seine, et nous semble devoir être attribué à la vitesse acquise par les molécules liquides pendant le flot.

Les courbes de basse-mer de la Gironde montrent aussi que la mer descend de $0^m.10$ plus bas au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les mortes-eaux, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.15$ à $0^m.20$ de moins au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les vives-eaux. En somme, elle descend donc plus sur le second point que sur le premier, ce qui explique

Pendant les crues, on remarque quelquefois que le courant de flot se produit avec assez de vitesse sur les bords, tandis que le jusant ne cesse pas au milieu du fleuve pendant toute la période de la marée ascendante. Ce fait a été particulièrement observé sur la Seine, à Duclair et sur plusieurs autres points, en morte-eau.

Quant le mascaret se produit sur la Seine, il forme généralement en plan un arc de cercle convexe vers la mer, de telle sorte qu'il arrive plus tôt sur les bords qu'au milieu du fleuve. Cette différence semble tenir encore à la même cause, c'est-à-dire à ce que les molécules liquides voisines des rives ont moins de vitesse que celles du milieu, et cèdent plus tôt aux causes qui tendent à leur imprimer un mouvement vers l'amont.

La durée de l'étale de flot est très-variable, comme celle de l'étale de jusant. On peut dire qu'elle est en général de 10′ sur la Seine. Cet étale est quelquefois presque nul et parfois il dure 20′ et 25′.

Sur la Gironde, on a observé les étales de flot au Verdon, à Blaye et au Bec-d'Ambès. On a trouvé qu'ils duraient en moyenne 26′ au Verdon, 14′ à Blaye et 10′ au Bec-d'Ambès. Il semblerait résulter de ces observations que la durée de l'étale de flot diminue à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Il a été jusqu'ici impossible de vérifier cette loi sur la Seine, faute d'observations assez nombreuses.

On remarque que l'étale de flot commence et finit plus tôt sur les bords qu'au milieu de la Seine. Ce fait est analogue à celui que l'on observe pour les étales de jusant, et paraît dû à la même cause. La différence atteint quelquefois de trois à quatre heures. L'étale du jusant n'a fini au milieu de la Seine à Villequier, le 16 août 1860, que 3^h 36′ après avoir cessé d'exister aux bords du fleuve. La différence de la fin de l'étale de flot au bord et au milieu, sur le même point, a été de 4^h 5′ le 18 septembre de la même année. Dans ces circonstances les courants se dirigent pen-

dant plus de trois heures en sens inverses au milieu du fleuve et sur ses rives.

On a observé simultanément sur la Gironde, à Blaye et au Bec-d'Ambès, pendant quinze jours consécutifs, du 8 au 22 septembre 1845, les retards des étales de flot et de jusant sur les pleines et les basses mers, et les dénivellations de la marée pendant ces retards.

Les eaux de la Garonne étaient alors assez basses et ne pouvaient avoir que peu d'influence sur les résultats. On a trouvé pour la moyenne des temps :

A Blaye 33′ à la pleine mer et 36′ à la bassse mer.

Au Bec d'Ambès 27′ à la pleine mer et 23′ à la basse mer.

Et pour la moyenne de la dénivellation de la marée :

A Blaye, $0^m.18$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.52$ d'exhaussement à la basse mer.

Au Bec-d'Ambès, $0^m.20$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.47$ d'élévation à la basse mer.

Si l'on se reporte aux lieux géométriques des pleines et des basses mers sur la Gironde (fig. 34), on voit que les pleines mers s'élèvent de $0^m.18$ entre Blaye et le Bec-d'Ambès en vive-eau, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.06$ à $0^m.07$ en morte-eau entre les mêmes points ; elles sont donc en moyenne plus hautes au Bec-d'Ambès qu'à Blaye, et, d'après ce que nous avons dit au sujet des retards des étales de flot sur les pleines mers, l'étale de flot devrait suivre presque immédiatement le moment du plein. Le retard que l'on observe est moindre de deux heures environ que sur la Seine, et nous semble devoir être attribué à la vitesse acquise par les molécules liquides pendant le flot.

Les courbes de basse-mer de la Gironde montrent aussi que la mer descend de $0^m.10$ plus bas au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les mortes-eaux, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.15$ à $0^m.20$ de moins au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les vives-eaux. En somme, elle descend donc plus sur le second point que sur le premier, ce qui explique

Pendant les crues, on remarque quelquefois que le courant de flot se produit avec assez de vitesse sur les bords, tandis que le jusant ne cesse pas au milieu du fleuve pendant toute la période de la marée ascendante. Ce fait a été particulièrement observé sur la Seine, à Duclair et sur plusieurs autres points, en morte-eau.

Quant le mascaret se produit sur la Seine, il forme généralement en plan un arc de cercle convexe vers la mer, de telle sorte qu'il arrive plus tôt sur les bords qu'au milieu du fleuve. Cette différence semble tenir encore à la même cause, c'est-à-dire à ce que les molécules liquides voisines des rives ont moins de vitesse que celles du milieu, et cèdent plus tôt aux causes qui tendent à leur imprimer un mouvement vers l'amont.

La durée de l'étale de flot est très-variable, comme celle de l'étale de jusant. On peut dire qu'elle est en général de 10′ sur la Seine. Cet étale est quelquefois presque nul et parfois il dure 20′ et 25′.

Sur la Gironde, on a observé les étales de flot au Verdon, à Blaye et au Bec-d'Ambès. On a trouvé qu'ils duraient en moyenne 26′ au Verdon, 14′ à Blaye et 10′ au Bec-d'Ambès. Il semblerait résulter de ces observations que la durée de l'étale de flot diminue à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Il a été jusqu'ici impossible de vérifier cette loi sur la Seine, faute d'observations assez nombreuses.

On remarque que l'étale de flot commence et finit plus tôt sur les bords qu'au milieu de la Seine. Ce fait est analogue à celui que l'on observe pour les étales de jusant, et paraît dû à la même cause. La différence atteint quelquefois de trois à quatre heures. L'étale du jusant n'a fini au milieu de la Seine à Villequier, le 16 août 1860, que 3^h 36′ après avoir cessé d'exister aux bords du fleuve. La différence de la fin de l'étale de flot au bord et au milieu, sur le même point, a été de 4^h 5′ le 18 septembre de la même année. Dans ces circonstances les courants se dirigent pen-

dant plus de trois heures en sens inverses au milieu du fleuve et sur ses rives.

On a observé simultanément sur la Gironde, à Blaye et au Bec-d'Ambès, pendant quinze jours consécutifs, du 8 au 22 septembre 1845, les retards des étales de flot et de jusant sur les pleines et les basses mers, et les dénivellations de la marée pendant ces retards.

Les eaux de la Garonne étaient alors assez basses et ne pouvaient avoir que peu d'influence sur les résultats. On a trouvé pour la moyenne des temps :

A Blaye 33′ à la pleine mer et 36′ à la bassse mer.

Au Bec d'Ambès 27′ à la pleine mer et 23′ à la basse mer.

Et pour la moyenne de la dénivellation de la marée :

A Blaye, $0^m.18$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.52$ d'exhaussement à la basse mer.

Au Bec-d'Ambès, $0^m.20$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.47$ d'élévation à la basse mer.

Si l'on se reporte aux lieux géométriques des pleines et des basses mers sur la Gironde (fig. 34), on voit que les pleines mers s'élèvent de $0^m.18$ entre Blaye et le Bec-d'Ambès en vive-eau, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.06$ à $0^m.07$ en morte-eau entre les mêmes points ; elles sont donc en moyenne plus hautes au Bec-d'Ambès qu'à Blaye, et, d'après ce que nous avons dit au sujet des retards des étales de flot sur les pleines mers, l'étale de flot devrait suivre presque immédiatement le moment du plein. Le retard que l'on observe est moindre de deux heures environ que sur la Seine, et nous semble devoir être attribué à la vitesse acquise par les molécules liquides pendant le flot.

Les courbes de basse-mer de la Gironde montrent aussi que la mer descend de $0^m.10$ plus bas au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les mortes-eaux, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.15$ à $0^m.20$ de moins au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les vives-eaux. En somme, elle descend donc plus sur le second point que sur le premier, ce qui explique

Pendant les crues, on remarque quelquefois que le courant de flot se produit avec assez de vitesse sur les bords, tandis que le jusant ne cesse pas au milieu du fleuve pendant toute la période de la marée ascendante. Ce fait a été particulièrement observé sur la Seine, à Duclair et sur plusieurs autres points, en morte-eau.

Quant le mascaret se produit sur la Seine, il forme généralement en plan un arc de cercle convexe vers la mer, de telle sorte qu'il arrive plus tôt sur les bords qu'au milieu du fleuve. Cette différence semble tenir encore à la même cause, c'est-à-dire à ce que les molécules liquides voisines des rives ont moins de vitesse que celles du milieu, et cèdent plus tôt aux causes qui tendent à leur imprimer un mouvement vers l'amont.

La durée de l'étale de flot est très-variable, comme celle de l'étale de jusant. On peut dire qu'elle est en général de 10′ sur la Seine. Cet étale est quelquefois presque nul et parfois il dure 20′ et 25′.

Sur la Gironde, on a observé les étales de flot au Verdon, à Blaye et au Bec-d'Ambès. On a trouvé qu'ils duraient en moyenne 26′ au Verdon, 14′ à Blaye et 10′ au Bec-d'Ambès. Il semblerait résulter de ces observations que la durée de l'étale de flot diminue à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Il a été jusqu'ici impossible de vérifier cette loi sur la Seine, faute d'observations assez nombreuses.

On remarque que l'étale de flot commence et finit plus tôt sur les bords qu'au milieu de la Seine. Ce fait est analogue à celui que l'on observe pour les étales de jusant, et paraît dû à la même cause. La différence atteint quelquefois de trois à quatre heures. L'étale du jusant n'a fini au milieu de la Seine à Villequier, le 16 août 1860, que 3^h 36′ après avoir cessé d'exister aux bords du fleuve. La différence de la fin de l'étale de flot au bord et au milieu, sur le même point, a été de 4^h 5′ le 18 septembre de la même année. Dans ces circonstances les courants se dirigent pen-

dant plus de trois heures en sens inverses au milieu du fleuve et sur ses rives.

On a observé simultanément sur la Gironde, à Blaye et au Bec-d'Ambès, pendant quinze jours consécutifs, du 8 au 22 septembre 1845, les retards des étales de flot et de jusant sur les pleines et les basses mers, et les dénivellations de la marée pendant ces retards.

Les eaux de la Garonne étaient alors assez basses et ne pouvaient avoir que peu d'influence sur les résultats. On a trouvé pour la moyenne des temps :

A Blaye 33′ à la pleine mer et 36′ à la bassse mer.

Au Bec d'Ambès 27′ à la pleine mer et 23′ à la basse mer.

Et pour la moyenne de la dénivellation de la marée :

A Blaye, $0^m.18$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.52$ d'exhaussement à la basse mer.

Au Bec-d'Ambès, $0^m.20$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.47$ d'élévation à la basse mer.

Si l'on se reporte aux lieux géométriques des pleines et des basses mers sur la Gironde (fig. 34), on voit que les pleines mers s'élèvent de $0^m.18$ entre Blaye et le Bec-d'Ambès en vive-eau, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.06$ à $0^m.07$ en morte-eau entre les mêmes points ; elles sont donc en moyenne plus hautes au Bec-d'Ambès qu'à Blaye, et, d'après ce que nous avons dit au sujet des retards des étales de flot sur les pleines mers, l'étale de flot devrait suivre presque immédiatement le moment du plein. Le retard que l'on observe est moindre de deux heures environ que sur la Seine, et nous semble devoir être attribué à la vitesse acquise par les molécules liquides pendant le flot.

Les courbes de basse-mer de la Gironde montrent aussi que la mer descend de $0^m.10$ plus bas au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les mortes-eaux, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.15$ à $0^m.20$ de moins au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les vives-eaux. En somme, elle descend donc plus sur le second point que sur le premier, ce qui explique

Pendant les crues, on remarque quelquefois que le courant de flot se produit avec assez de vitesse sur les bords, tandis que le jusant ne cesse pas au milieu du fleuve pendant toute la période de la marée ascendante. Ce fait a été particulièrement observé sur la Seine, à Duclair et sur plusieurs autres points, en morte-eau.

Quant le mascaret se produit sur la Seine, il forme généralement en plan un arc de cercle convexe vers la mer, de telle sorte qu'il arrive plus tôt sur les bords qu'au milieu du fleuve. Cette différence semble tenir encore à la même cause, c'est-à-dire à ce que les molécules liquides voisines des rives ont moins de vitesse que celles du milieu, et cèdent plus tôt aux causes qui tendent à leur imprimer un mouvement vers l'amont.

La durée de l'étale de flot est très-variable, comme celle de l'étale de jusant. On peut dire qu'elle est en général de 10′ sur la Seine. Cet étale est quelquefois presque nul et parfois il dure 20′ et 25′.

Sur la Gironde, on a observé les étales de flot au Verdon, à Blaye et au Bec-d'Ambès. On a trouvé qu'ils duraient en moyenne 26′ au Verdon, 14′ à Blaye et 10′ au Bec-d'Ambès. Il semblerait résulter de ces observations que la durée de l'étale de flot diminue à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Il a été jusqu'ici impossible de vérifier cette loi sur la Seine, faute d'observations assez nombreuses.

On remarque que l'étale de flot commence et finit plus tôt sur les bords qu'au milieu de la Seine. Ce fait est analogue à celui que l'on observe pour les étales de jusant, et paraît dû à la même cause. La différence atteint quelquefois de trois à quatre heures. L'étale du jusant n'a fini au milieu de la Seine à Villequier, le 16 août 1860, que 3^h 36′ après avoir cessé d'exister aux bords du fleuve. La différence de la fin de l'étale de flot au bord et au milieu, sur le même point, a été de 4^h 5′ le 18 septembre de la même année. Dans ces circonstances les courants se dirigent pen-

dant plus de trois heures en sens inverses au milieu du fleuve et sur ses rives.

On a observé simultanément sur la Gironde, à Blaye et au Bec-d'Ambès, pendant quinze jours consécutifs, du 8 au 22 septembre 1845, les retards des étales de flot et de jusant sur les pleines et les basses mers, et les dénivellations de la marée pendant ces retards.

Les eaux de la Garonne étaient alors assez basses et ne pouvaient avoir que peu d'influence sur les résultats. On a trouvé pour la moyenne des temps :

A Blaye 33′ à la pleine mer et 36′ à la bassse mer.

Au Bec d'Ambès 27′ à la pleine mer et 23′ à la basse mer.

Et pour la moyenne de la dénivellation de la marée :

A Blaye, $0^m.18$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.52$ d'exhaussement à la basse mer.

Au Bec-d'Ambès, $0^m.20$ d'abaissement à la pleine mer, et $0^m.47$ d'élévation à la basse mer.

Si l'on se reporte aux lieux géométriques des pleines et des basses mers sur la Gironde (fig. 34), on voit que les pleines mers s'élèvent de $0^m.18$ entre Blaye et le Bec-d'Ambès en vive-eau, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.06$ à $0^m.07$ en morte-eau entre les mêmes points ; elles sont donc en moyenne plus hautes au Bec-d'Ambès qu'à Blaye, et, d'après ce que nous avons dit au sujet des retards des étales de flot sur les pleines mers, l'étale de flot devrait suivre presque immédiatement le moment du plein. Le retard que l'on observe est moindre de deux heures environ que sur la Seine, et nous semble devoir être attribué à la vitesse acquise par les molécules liquides pendant le flot.

Les courbes de basse-mer de la Gironde montrent aussi que la mer descend de $0^m.10$ plus bas au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les mortes-eaux, et qu'elles s'abaissent, au contraire, de $0^m.15$ à $0^m.20$ de moins au Bec-d'Ambès qu'à Blaye pendant les vives-eaux. En somme, elle descend donc plus sur le second point que sur le premier, ce qui explique

le retard de l'étale de jusant sur la basse mer, les résultats ci-dessus n'étant d'ailleurs que des moyennes.

On a également remarqué sur la Gironde que les plus grands exhaussements pendant les retards des étales de jusant sur les basses mers et les abaissements les plus forts pendant les retards des étales de flot sur les pleines-mers correspondaient aux plus hautes marées de vive-eau et réciproquement.

Sur la Seine, l'abaissement qui se produit entre le moment de la pleine-mer et la fin de l'étale de flot a atteint $1^m.43$ à Villequier, le 25 septembre 1858, surlendemain de syzygie. Le retard de la fin de l'étale de flot sur la pleine-mer avait été le même jour de 3^h 25′. Cet abaissement est généralement moindre, et n'est guère que d'un mètre environ sur le même point dans les marées de vive-eau. Il est beaucoup plus petit dans les mortes-eaux. Il est du reste extrêmement variable en raison des obstacles plus ou moins grands que le flot rencontre en pénétrant dans la Seine. On remarque qu'il est plus fort quand la marée entre librement dans ce fleuve, et qu'il est moindre quand elle trouve des coudes, des bancs et des hauts fonds à son embouchure.

Anomalies remarquables. — Les mouvements des marées peuvent offrir des anomalies assez remarquables. Ainsi, le 13 novembre 1860, le courant de flot s'était établi à Villequier à 8^h 43′ du matin. A midi, les eaux avaient repris leur cours vers la mer, lorsqu'il s'est formé un second courant de flot qui a duré, au milieu du fleuve, jusqu'à 1^h 28′.

Le même fait avait eu lieu à une autre époque, mais sur une toute autre échelle, et avait entraîné des conséquences désastreuses. Le 10 novembre 1810, la marée descendait déjà depuis quelque temps à Quillebeuf et devait baisser longtemps encore, lorsqu'elle reprit subitement un mouvement ascensionnel et s'éleva à une hauteur extraordinaire. Une partie des terrains d'alluvion du Marais-Vernier fut emportée et le presbytère de Quillebeuf fut démoli.

En remontant plus haut on trouverait à citer des anomalies d'un autre genre. Ainsi, en 1716, la pleine mer dura au Havre pendant 24 heures. En 1525 eut lieu la *mâle marée*, qui inonda toute la ville du Havre. Ces faits sont heureusement extrêmement rares.

Vitesse de propagation de la basse et de la pleine mer.

I. *Sur la Seine: 1° en étiage.* — La vitesse de propagation des basses mers varie dans les diverses parties de la Seine. Le tableau suivant la donne en moyenne pour les jours où des observations ont été faites en étiage de quart d'heure en quart d'heure sur toute la Seine maritime entre le Havre et Pont-de-l'Arche. Ainsi que nous l'avons dit en parlant de ce genre d'observations, la montre de chaque observateur a été réglée au chemin de fer de Paris au Havre, la veille de chaque jour d'observation, sur l'heure en temps moyen au méridien de Paris, et a été vérifiée soigneusement le lendemain.

DÉSIGNATION des LOCALITÉS.	VITESSE DE PROPAGATION de la basse mer en vive-eau.	de la basse mer en morte-eau.	de la pleine mer en vive-eau.	de la pleine mer en morte-eau.	OBSERVATIONS.
	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	
Du Havre au Hode.	2.21	2.79	14.36	»	(1) La pleine mer a eu lieu à Tancarville en même temps qu'à Quillebeuf, et à Villequier en même temps qu'à la Mailleraye.
Du Hode à Tancarville.	4.37	4.83	15.55	10.00	
De Tancarville à Quillebeuf. .	4.44	3.05	» (1)	5.61	
De Quillebeuf à Villequier. .	5.93	3.85	5.93	6.50	
De Villequier à la Mailleraye..	6.10	5.02	» (1)	8.13	
De la Mailleraye à Duclair . .	7.97	6.03	4.97	6.21	
De Duclair à la Bouille	7.50	5.66	3.06	3.41	
De la Bouille à Rouen.	5.20	5.20	3.27	7.73	
De Rouen à Oissel..	6.19	4.63	»	4.42	
De Oissel à Elbeuf.	6.87	5.20	3.90	1.59	
Moyennes.	5.68	4.63	7.29	5.96	

On voit que l'ondulation de la marée qui remonte la Seine s'avance, à mer basse, avec une grande lenteur entre le Havre et Quillebeuf. Au delà, la basse mer se propage tout à coup avec beaucoup plus de rapidité et atteint sa plus grande vitesse entre Villequier et Duclair. Elle paraît s'amortir ensuite jusqu'à Elbeuf. La lenteur avec laquelle la marée pénètre dans la Seine, entre le Havre et Quillebeuf, s'explique aisément par la présence des bancs qui encombrent l'embouchure de ce fleuve. Le peu de rapidité avec laquelle la mer s'élève dans les prémiers moments au Havre doit y contribuer également. La vitesse de propagation des basses mers en amont de Quillebeuf est en partie due à la hauteur qu'a déjà acquise l'ondulation de la marée, quand elle pénètre enfin et se précipite dans la partie endiguée de la Seine.

2° *En temps de crue.* — On n'a pas d'observations aussi nombreuses sur la propagation des basses et des pleines mers durant les crues. Voici néanmoins les résultats obtenus au mois de mars 1860 :

DÉSIGNATION des LOCALITÉS.	VITESSE DE PROPAGATION de la basse mer		de la pleine mer		OBSERVATIONS.
	le 9 mars 1860, en vive-eau.	le 15 mars 1860, en morte-eau	le 9 mars 1860, en vive-eau.	le 15 mars 1860, en morte-eau.	
	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	
Du Havre au Hode	2.88	1.91	10.97	»	P. L. le 7 mars 1860 à 0h 53' du soir (1.17).
Du Hode à Tancarville . . .	3.67	2.33	5.60	9.33	D. Q. le 14 mars 1860 à 9h 17' du matin.
De Tancarville à Quillebeuf.	4.27	4.27	4.85	7.11	N. L. le 22 mars 1860 à 2h 05' du soir (0.88).
De Quillebeuf à Villequier.	6.18	4.56	4.36	9.72	
De Villequier à la Mailleraye	5.69	4.27	5.69	4.88	Hauteurs d'eau au-dessus de l'ancien étiage à Nantes :
De la Mailleraye à Duclair.	8.125	6.03	5.63	14.08	
De Duclair à la Bouille. . .	5.17	3.75	6.67	5.45	Le 7 mars 1860. 3m.62 Le 8 *id.* 3 .52 Le 13 *id.* 2 .69 Le 14 *id.* 2 .58
De la Bouille à Rouen. . .	7.28	5.10	3.00	4.25	
De Rouen à Oissel.	6.19	4.33	5.42	7.22	
De Oissel à Elbeuf	8.58	8.58	3.12	1.37	Vents :
Moyennes entre la Hode et Elbeuf.	7.88	6.18	6.33	9.06	Le 9 mars 1860, N.-E, faible brise. Le 15 mars 1860, N -O., petite brise.

II. *Sur la Gironde et la Garonne : 1° En temps d'étiage.* — M. l'ingénieur en chef Pairier cite, dans un mémoire à l'appui de l'avant-projet dressé le 23 juillet 1849 pour l'amélioration des passes de la Basse-Garonne, les vitesses de propagation de la basse et de la pleine mer qui ont été observées sur ce fleuve en étiage, avec toute l'exactitude possible, pendant 3 jours de marée de vive-eau. Ces vitesses ont été moyennement les suivantes :

DÉSIGNATION DES LOCALITÉS.	DISTANCES intermédiaires.	VITESSE DE PROPAGATION PAR SECONDE	
		de la basse mer.	de la pleine mer.
	mètres.	mètres.	mètres.
Entre le Verdon et le Bec-d'Ambès.	68 710.00	5.20	9.89
Entre le Bec-d'Ambès et Bordeaux.	24 200.00	5.10	7.20
Entre Bordeaux et Langoiran. . .	23 226.00	4.66	8.23
Entre Langoiran et Langon. . . .	19 925.90	2.54	5.45
Moyennes entre le Verdon et Langon. . .		4.37	7.69

Le ralentissement de l'ondulation de la marée est, comme on le voit, très-marqué à partir de Langoiran. La pente de la Garonne, qui devient très-forte à basse mer en amont de ce point, explique fort bien la lenteur de la marche de l'ondulation qui la gravit.

Les courbes de marée relevées pendant la morte-eau d'étiage du 2 octobre 1847 sur la Garonne, ont donné les résultats suivants :

DÉSIGNATION DES LOCALITÉS.	DISTANCES intermédiaires.	VITESSE DE PROPAGATION PAR SECONDE	
		de la basse mer.	de la pleine mer.
	mètres.	mètres.	mètres.
Entre le Verdon et le Bec-d'Ambès.	68 710.00	6.03	8.95
Entre le Bec-d'Ambès et Bordeaux.	24 200.00	4.21	8.89
Entre Bordeaux et Langon. . . .	43 151.90	2.51	5.87
Moyenne entre le Verdon et Langon. . . .		4.25	7.90

On voit que les basses mers se propagent plus lentement en morte-eau qu'en vive-eau sur la Garonne.

2° *En temps de crue.* — Les observations faites sur la Garonne, les 17 et 24 février 1847, permettent d'établir le tableau suivant qui donne les vitesses de propagation des basses et des pleines mers sur ce fleuve en temps de crue.

DÉSIGNATION DES LOCALITÉS.	Distances intermédiaires.	VITESSE DE PROPAGATION PAR SECONDE			
		des basses mers		des pleines mers	
		le 17 févr. 1847 en vive-eau	le 24 févr. 1847 en morte-eau.	le 17 févr. 1847 en vive-eau.	le 24 févr. 1847 en morte-eau
	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.
Entre le Verdon et Pauillac. .	47 820	4.81	8.05	12.45	»
Entre Pauillac et Blaye	9 270	3.68	3.59	»	4.68
Entre Blaye et le Bec-d'Ambès.	11 620	4.84	4.12	4.30	7.45
Entre le Bec-d'Ambès et Bordeaux.	24 200	5.04	4.41	11.52	8.23
Entre Bordeaux et Quinsac. . .	13 850	6.59	5.13	11.54	5.13
Moyennes entre le Verdon et Quinsac.		4.99	5.06	9.95	6.37

Ce tableau semble indiquer que la propagation des pleines mers est plus lente en morte-eau qu'en vive-eau, en temps de crue. Mais il faudrait avoir plus d'observations que nous n'en avons eu sur la Garonne pour pouvoir établir des moyennes et en tirer des conclusions positives sur les vitesses de propagation des basses et des pleines mers pendant les crues de ce fleuve.

Dans la marée de vive-eau du 17 février 1847, qui correspondait à une crue d'environ 7 mètres dans la Garonne, le flot est arrivé de 20 à 30′ plus tard à toutes les stations et la pleine mer a eu lieu plus tôt à Bordeaux et dans les ports supérieurs, de sorte que la durée du flot a été moindre d'environ une heure pour ces derniers ports.

Vitesse de propagation des étales. — Les observations régulières sur les étales de jusant n'ont été commencées sur la

Seine qu'en décembre 1859. Le mascaret, qui n'a cessé de se manifester sur ce fleuve depuis cette époque, les a fait coïncider avec les basses mers pendant toutes les vives-eaux. Les observations sur les mêmes étales en morte-eau ne permettent encore d'établir qu'approximativement le chiffre de la vitesse de leur propagation pendant les mortes-eaux, et seulement entre Quillebeuf et Villequier. Ce chiffre est moyennement de $4^m.83$ par seconde.

Les observations sur les étales de flot, datent de 1857. Elles donnent des résultats qui suivent :

DÉSIGNATION DES LOCALITÉS.	VITESSE DE PROPAGATION DES ÉTALES DE FLOT			
	en vive-eau		en morte-eau	
	en temps d'étiage.	en temps de crue.	en temps d'étiage.	en temps de crue.
	mètres	mètres	mètres	mètres
Entre Quillebeuf et Villequier.	2.14	2.40	3.05	5.85
Entre Villequier et Duclair . .	6.98	7.81	6.70	6.025

Les observations faites en amont de Duclair sont encore trop peu nombreuses pour pour qu'elles puissent fournir un résultat certain. Les vitesses ci-dessus ont d'ailleurs été obtenues en prenant la fin des étales de flot au milieu du fleuve et sont la moyenne d'un assez grand nombre de chiffres.

On remarquera que les vitesses consignées dans le tableau qui précède sont beaucoup plus grandes entre Villequier et Duclair qu'entre Quillebeuf et Villequier. Cette différence paraît tenir à ce que la Seine est beaucoup plus profonde entre les deux premiers points qu'entre les deux seconds.

Détermination des hauteurs que les pleines et les basses mers doivent atteindre et des quantités d'eau que l'on trouvera sur les hauts fonds d'une rivière à marée. — L'étude des mouvements des marées sur un fleuve permet, jusqu'à un cer-

tain point, de prédire les hauteurs d'eau que l'on doit y rencontrer au-dessus de l'étiage. Ces hauteurs une fois connues, des sondages, faits à la fin de chaque morte-eau, donnent quelques jours à l'avance la profondeur que l'on trouvera sur chaque haut fond au moment des pleines et des basses mers. Voici la méthode qu'on employe sur la Seine maritime pour obtenir ces renseignements, qui offrent un grand intérêt pour la navigation.

Les hauteurs d'eau dans une rivière à marée dépendent des lunaisons, de la hauteur du baromètre, du coefficient de la marée, du vent et de la plus ou moins grande abondance des eaux d'amont. Les premières causes que nous venons d'énumérer et l'influence du vent donnent aux marées les hauteurs qu'elles ont à l'embouchure ; celles-ci déterminent en grande partie le niveau qu'elles atteignent dans le fleuve. Les hauteurs des eaux d'amont sont fournies par des observations directes. Pour une même hauteur d'eau à l'embouchure, le jour de la lune influe aussi beaucoup sur le niveau des pleines et des basses mers dans le fleuve, parce que, dans la partie amont, les basses mers vont en s'élevant entre les marées de quartier et celles de syzygie, tandis qu'elles s'abaissent entre celles de syzygie et celles de quartier.

Cela posé, l'on a d'abord dressé pour les pleines mers une série de tableaux en tête desquels on a inscrit les hauteurs d'eau observées au Havre et qui ne diffèrent pas de 10 centimètres : ainsi, l'un de ces tableaux est relatif à toutes les observations de pleines mers comprises entre les cotes $6^{m}.91$ et 7 mètres à l'échelle du marégraphe du Havre. Chaque tableau a ensuite été partagé en deux moitiés, l'une pour les cotes observées sur la Seine maritime entre la plus haute marée de syzygie et la plus basse marée de quartier, l'autre pour les cotes prises entre la plus basse marée de quartier et la plus haute marée de syzygie. L'on admet que la marée la plus voisine de la 36e heure après

la syzygie ou la quadrature est la plus haute marée de syzygie ou la plus basse marée de quartier. Enfin, dans chaque moitié de tableau, l'on a mis les cotes relevées à toutes les échelles hydrométriques de la Seine maritime et les hauteurs correspondantes des eaux de la Seine en amont. Ces hauteurs sont celles qui ont été observées à Mantes, où la Seine a reçu tous ses affluents, sauf l'Eure et l'Andelle qui ne peuvent agir sensiblement sur la hauteur de ses eaux.

L'on doit avoir en général des tableaux distincts pour les pleines et les basses mers; mais, comme le déversoir formé par les sables de l'embouchure de la Seine maintient les eaux de ce fleuve à plus de 3 mètres au-dessus des basses mers au Havre en vive-eau, le niveau de la marée basse à l'embouchure n'influe pas sur celui des basses mers dans la Seine, qui ne dépend alors que de celui des hautes mers au Havre. Dans une rivière qui ne présenterait pas les mêmes circonstances, il faudrait ne faire figurer que les hautes mers dans le tableau relatif aux hautes mers de l'embouchure et les basses mers dans des tableaux relatifs aux mers basses. Voici un exemple des tableaux dressés pour la Seine maritime.

Cotes du Havre de 6.94 à 7.00.

Cotes prises entre la marée de quadrature et celle de syzygie.

DATES.	Pleines mers au Havre (1).	Vents à midi, au phare de Fatouville	MANTES (2). La veille.	MANTES (2). L'avant-veille.	ELBEUF. Basse mer.	ELBEUF. Pleine mer.	OISSEL. Basse mer.	OISSEL. Pleine mer.	ROUEN. Basse mer.	ROUEN. Pleine mer.	LA BOUILLE. Basse mer.	LA BOUILLE. Pleine mer.	DUCLAIR. Basse mer.	DUCLAIR. Pleine mer.	VILLEQUIER. Basse mer.	VILLEQUIER. Pleine mer.	QUILLEBEUF. Basse mer.	QUILLEBEUF. Pleine mer.	TANCARVILLE. Basse mer.	TANCARVILLE. Pleine mer.	OBSERVATIONS.
19 mars 1860	6.92	(3) O 1	4.17	4.22	(4) 6.99	(4) 6.83	7.77	7.47	8.49	7.81	9.00	8.12	9.20	8.26	10.01	8.35	10.70	8.35	11.79	8.30	(1) Les cotes du Havre sont prises à l'échelle du marégraphe de cette ville.
29 mai 1860.	....	....																			(2) Le zéro de l'échelle de Mantes est à 0m.80 au-dessous de l'étiage ordinaire.
⋮																					(3) Les vents les plus faibles sont désignés par l'indice 1 et les plus forts par l'indice 5.
																					(4) Les cotes des pleines et basses mers sont rapportées à un plan passant à 14m.76 au-dessous du zéro de l'échelle hydrométrique du pont de la Tournelle et à 90 mètres au-dessous du plan de comparaison du nivellement de Paris.

Cotes du Havre de 4.91 à 7.00.

Cotes prises entre la marée de syzygie et celle de quadrature.

DATES.	Pleines mer au Havre (1).	Vents à midi, au phare de Fatouville.	MANTES.		ELBEUF.		OISSEL.		ROUEN.		LA BOUILLE.		DUCLAIR.		VILLEQUIER.		QUILLEBEUF.		TANCARVILLE		OBSERVATIONS.
			La veille.	L'avant-veille.	Basse mer.	Pleine mer.	Basse mer.	Pleine mer.	Basse mer.	Pleine mer.	Basse mer.	Pleine mer.	Basse mer.	Pleine mer.	Basse mer.	Pleine mer.	Basse mer.	Pleine mer.	Basse mer.	Pleine mer.	
9 juin 1860.	7.00	S-E 1	1.53	1.53	8.94	8.44	9.30	»	9.80	8.76	9.95	8.92	10.10	8.91	10.47	8.70	10.93	8.45	11.25	8.37	

Après avoir dressé pour la Seine les tableaux dont nous venons de donner le modèle, on a fait une série correspondante de tableaux graphiques. Chaque tableau graphique ne se rapporte qu'à une seule échelle hydrométrique, à celle de Villequier, par exemple (fig. 42). On y a pris les hauteurs à Mantes pour abscisses et celles à l'échelle de Villequier pour ordonnées; puis, on a figuré chaque observation de pleine mer par un point, en ayant soin d'inscrire à côté la direction et l'intensité du vent. Lorsque le nombre des observations a été suffisant, il a été facile de tracer une courbe moyenne donnant la cote des eaux pour une hauteur connue de la Seine à Mantes.

Il est essentiel que la direction et l'intensité du vent inscrits sur ces tableaux soient ceux des courants généraux de l'atmosphère. Sur la Seine, on prend les observations faites au phare de Fatouville, dont l'élévation est telle que les côtes et les vallées d'alentour ne peuvent avoir que peu d'influence sur les couches d'air qui l'environnent.

Les hauteurs des marées au Havre sont données d'avance par l'Annuaire des marées; les hauteurs d'eau à Mantes peuvent être connues au Havre la veille ou l'avant-veille du jour où leur action se fait sentir sur la Seine maritime. On pourra donc avoir d'avance les cotes des pleines mers sur les différents points. Des sondages faits à la fin de chaque morte-eau donneront la cote des hauts-fonds. Les navires qui remontront la Seine connaîtront ainsi la quantité d'eau qu'ils trouveront à l'heure du plein dans les endroits les moins profonds de ce fleuve.

Le service hydrométrique du bassin de la Seine indique à l'avance les crues auxquelles on doit s'attendre à Paris et les hauteurs approximatives qu'elles doivent avoir. Avec des renseignements plus prompts et plus étendus, il lui serait possible de faire connaître les hauteurs d'eau à Mantes quatre ou cinq jours avant que leur influence ne pût se manifester dans la Seine maritime.

Un élément variable influe malheureusement sur les hauteurs d'eau dans les rivières à marée; c'est le vent. Mais les tableaux graphiques que nous venons de décrire font connaître quelle est son action sur chaque point, suivant sa direction et son intensité. Les observations faites à la pleine mer précédente donneront d'ailleurs approximativement aux marins la surélévation de la pleine mer suivante au Havre. Ils auront donc tous les éléments nécessaires pour connaître les hauteurs d'eau qu'ils trouveront sur les hauts-fonds entre Rouen et la mer.

Vitesse de propagation des variations de hauteur de la Seine en amont, entre Poissy et la mer. — Pour dresser le tableau dont nous venons de parler tout à l'heure, il faut connaître les hauteurs d'eau qui correspondent à Mantes avec les cotes des pleines mer observées au Havre.

On a dressé des tableaux graphiques des variations de hauteur de la Seine, en prenant les jours pour abscisses et pour ordonnées les hauteurs d'eau aux différentes échelles où on les observe journellement en amont de Mantes. Si l'on trace des courbes analogues pour les échelles situées en aval jusqu'à Poses, où les mouvements des marées cessent de se faire sentir, on remarque que les changements de niveau qui ont lieu à Poissy se reproduisent vingt-quatre heures plus tard aux Andelys, à 95 kilomètres plus loin. On a observé de même que les différences de hauteur d'eau à Mantes amenaient des variations correspondantes sur la base de l'écluse de Poses, à 90 kilomètres au delà, au bout de vingt-quatre heures. Dans les crues, cette propagation des mouvements des eaux marche à peu près avec la même vitesse que dans les étiages, ou du moins, n'en diffère pas assez pour qu'on ne puise pas dire qu'il en est sensiblement ainsi.

Les cotes de hauteur d'eau sont relevées tous les jours à l'échelle de Mantes à midi. D'un autre côté on a les distances suivantes à partir de ce point.

De Mantes à Poses.....	90k.0
De Mantes à Rouen.....	132k.9
De Mantes à Yainville.....	189k.2
De Mantes à Quillebeuf.....	222k.6

En admettant donc que les variations se propagent de 95 kilomètres en vingt-quatre heures, on voit que les hauteurs à Mantes, à midi, donnent des cotes correspondantes le lendemain jusqu'à 142k.5 de ce point, c'est-à-dire jusqu'à 9k.6 au-dessous de Rouen, et le surlendemain jusqu'à 237,500 mètres, c'est-à-dire jusqu'à 14k.9 au-dessous de Quillebeuf.

Le mouvement des marées peut modifier la propagation des crues dans la Seine maritime, mais on reconnaît que la différence est peu importante au moyen des courbes annuelles des basses mers relevées aux différentes échelles hydrométriques de ce fleuve.

Courbes annuelles des basses et des pleines mers aux différentes échelles hydrométriques. — La courbe annuelle des basses mers sur un point donné s'obtient en prenant pour abscisses les différents jours de l'année, du 1er janvier au 31 décembre, et pour ordonnées les hauteurs des basses mers observées chaque jour sur ce point. La comparaison de ces courbes, qui sont analogues à celles des hauteurs d'eau entre Poissy et Poses dont nous avons parlé tout à l'heure, montre que la loi de la propagation des changements de hauteur d'eau entre Poses et la mer peut être considérée comme sensiblement la même qu'entre Poissy et Poses.

Nous considérerons donc les hauteurs d'eau observées à Mantes comme correspondant aux cotes de pleine et de basse mer du lendemain jusqu'à 9,600 mètres au-dessous de Rouen, et à celles du surlendemain jusqu'à 14k.9 au delà de Quillebeuf.

Dans les temps de crue, on fait généralement trois observations par jour aux échelles de Mantes. Si l'on voulait

dans ce cas une approximation plus grande des hauteurs d'eau sur la Seine maritime, on pourrait se servir des cotes prises à Mantes le matin ou le soir, en calculant les distances correspondantes comme nous venons de le faire, à raison de 95 kilomètres par vingt-quatre heures.

On peut obtenir des courbes annuelles de pleine mer comme les courbes annuelles de basse mer; mais elles ne nous paraissent pas offrir un aussi grand intérêt.

Lieux géométriques des étales de jusant et de flot. Courbes diverses relatives aux heures de ces étales et des pleines et des basses mers. — On pourrait décrire de même pour les étales de flot et de jusant, et pour les différences de niveau des basses mers et des étales de jusant ou des pleines mers et des étales de flot, des lieux géométriques analogues à ceux qui ont été décrits pour les basses et les pleines mers. Nous n'avons pas pu le faire faute d'observations suffisantes. Les courbes des étales, analogues aux lieux géométriques des pleines et des basses mers, nous paraîtraient offrir un intérêt réel pour la navigation descendante. Elles permettraient probablement de reconnaître les hauteurs que cette navigation peut rencontrer successivement sur les hauts-fonds, en descendant la Seine maritime.

Pour déterminer les heures des pleines et des basses mers et des étales de flot et de jusant, on pourrait se servir d'un moyen analogue à celui que nous avons indiqué pour les basses et les pleines mers. On prendrait pour abscisses les hauteurs des eaux d'amont, et pour ordonnées les retards des heures de pleine mer, de basse mer ou des étales, au point considéré, sur les heures analogues à l'embouchure. Les tableaux partiels ne correspondraient qu'à un intervalle de cinq minutes au Havre, par exemple, pour les pleines mers constatées dans ce port, et ne se composeraient que d'une seule partie.

Mais les différences notables que l'on remarque entre les retards des étales de flot sur les pleines mers, suivant la

direction et l'intensité du vent, rendent bien difficile d'arriver à un résultat certain par rapport à ces étales. Il faudrait tenir compte, avec le plus grand soin, des circonstances atmosphériques, en appréciant attentivement chaque observation, et le résultat auquel on parviendrait ne doit pas encore être tout à fait satisfaisant.

Les diverses courbes dont nous venons de parler donnent des anomalies considérables quand les heures n'ont pas été bien constatées. Il faut donc que les montres des observateurs soient vérifiées fréquemment, ainsi que les horloges qui servent à les régler. Sur la Seine on se sert des horloges des phares et de celle du marégraphe de Quillebeuf, qui sont dues à un excellent constructeur de Paris. Elles indiquent l'heure en temps moyen au méridien de Paris. La différence de l'heure moyenne au Havre et à Poses est de quatre à cinq minutes, quantité qu'il vaut mieux ne pas négliger, surtout quand on veut étudier des observations faites en même temps aux différentes échelles hydrométriques de la Seine.

Des observations d'heures parfaitement régulières ne se font pas depuis assez longtemps sur la Seine pour qu'on ait pu déterminer le moment des pleines et des basses mers par le moyen que nous venons d'indiquer; on s'est contenté de les calculer en prenant les moyennes des heures observées pendant plusieurs années, sans tenir compte des erreurs que pouvaient donner les montres des observateurs. On a calculé ces moyennes pour chacun des jours d'une lunaison, en distinguant les syzygies et les quadratures du matin et celles du soir. Ces calculs ont donné des tableaux qui suffisent généralement dans la pratique.

L'expérience démontre que les vents peuvent modifier d'une heure les indications qu'ils fournissent; mais, avec un peu d'habitude, on apprécie aisément les circonstances qui avancent ou retardent les instants des pleines et des basses mers.

Enfin l'un des principaux résultats qui ressortent de ces tableaux, est que le retard de l'heure de la basse mer en un jour est d'environ une demi-heure à l'époque des syzygies et d'une heure au moment des quadratures.

Routier compteur de M. Keller. — M. Keller, ingénieur hydrographe de la marine, a imaginé un moyen fort commode pour calculer la marche des navires. Ce moyen, qu'il a appliqué à la Manche, à la mer d'Allemagne et aux principaux fleuves qui viennent se jeter dans ces deux mers, consiste dans l'emploi d'un tableau qu'il désigne sous le nom de *routier compteur*. Celui de la Seine est reproduit dans les planches jointes à ce travail (fig. 43). Voici en quoi il consiste.

Une ligne horizontale a été divisée en parties égales, correspondant chacune à quatre milles nautiques. Les distances ont été comptées sur cette ligne depuis le Havre jusqu'à Rouen. Le Havre s'est ainsi trouvé correspondre à l'origine de la ligne à gauche, Quillebeuf à la 4e division et Rouen à la 17e. Aux extrémités et à chaque point de division de la ligne horizontale, on a élevé une ligne verticale. Sur la verticale de gauche on a pris 24 parties égales, et par chaque point de division on a mené une ligne horizontale. On a ensuite admis que chacune de ces horizontales correspondait à une heure différente du jour. On voit déjà, en faisant abstraction des vitesses des courants, qu'un navire partant du Havre à midi et filant huit milles à l'heure, franchira deux intervalles linéaires suivant la ligne horizontale et un suivant la ligne verticale. Ses positions successives, dans la première heure, seront données par une diagonale joignant le point de départ au point d'arrivée, c'est-à-dire la ligne 12 sur la verticale du Havre avec l'intersection de l'horizontale correspondant à 1h et de la troisième verticale. Si le navire marchait toujours de même, toutes ses positions seraient données par le prolongement de la diagonale dont il s'agit.

Sur le compteur ainsi disposé, l'on a tracé des lignes transversales qui donnent les heures des étales de jusant et de flot, les jours de syzygie sur chaque point. Ainsi l'heure de l'étale de jusant étant 9 heures à Quillebeuf, et celle de l'étale de flot midi, les lignes de ces étales passeront aux points d'intersection de la verticale où se trouve Quillebeuf avec les lignes correspondant à 9 heures et à midi. L'intervalle entre les deux lignes indiquées montre la durée du flot. L'espace compris entre l'étale de flot et celui de jusant qui le suit, fournit la durée du jusant. On a teinté en gris ce qui répond aux courants de flot, et on a laissé en blanc la partie relative au jusant. Des flèches indiquent la direction de ces deux courants, et des chiffres leurs vitesses moyennes en milles marins.

Enfin la position des divers ports a été mise sur la verticale qui répond à chacun d'eux et à la hauteur qui donne l'heure de la pleine mer près de ce port le jour de la syzygie.

Il est facile de décrire, au moyen de ce tableau, la route que suivra un navire dont la vitesse est donnée. Ainsi les courants de flot et de jusant étant supposés avoir une vitesse moyenne de deux nœuds, un bateau à vapeur, marchant à raison de dix nœuds à l'heure, avancera de douze nœuds dans le sens du courant, ou de huit nœuds en sens contraire. Il franchira donc trois interlignes verticaux à l'heure dans le premier cas, et deux dans le second. Une suite de diagonales tracées comme nous l'avons indiqué plus haut donnera sa marche. S'il part de Rouen à 4^h 1/2, une demi-heure après la basse mer, il rencontrera l'étale de jusant un peu en aval de Quillebeuf, vers 8^h 3/4, et il arrivera vers 10^h 3/4 au Havre, après un trajet de 6^h 1/4. On voit que l'on peut obtenir aisément la marche du même navire pour un départ à toute autre heure, soit de Rouen, soit d'un autre point de la Seine. Pour éviter de tracer des lignes sur le compteur, M. Keller conseille de se servir d'un

taffetas ciré transparent qui se placerait momentanément sur le routier compteur, et sur lequel on pourrait effacer avec une éponge humide les points marqués à l'encre.

Le tableau que nous venons de décrire ne fournit d'indications que pour les jours de sygygie, mais les chiffres qui se trouvent à sa gauche permettent de l'appliquer quelle que soit l'époque de la lunaison.

Deux lignes de chiffres horizontales placées au-dessus ou au-dessous et à gauche du tableau donnent les jours de la lune; la première comprend ceux qui se trouvent entre la nouvelle lune et la pleine lune, et la seconde entre la pleine et la nouvelle lune. Les chiffres des deux lignes sont placés les uns au-dessous des autres, de manière que deux d'entre eux mis l'un au-dessous de l'autre soient également éloignés des syzygies. Au-dessous des chiffres qui indiquent deux jours correspondants se trouve une ligne verticale. Les lignes horizontales qui donnent les heures sur le tableau du compteur sont prolongées de manière à couper ces verticales. Les heures déjà inscrites en chiffres romains sur le côté gauche du compteur, étant celles qui répondent aux syzygies, ont été mises sur les deux lignes verticales extrêmes, relatives aux jours de pleine ou de nouvelle lune. Les heures pour les jours de syzygie peuvent donc être lues soit en chiffres romains sur le bord du compteur, soit sur les verticales correspondant aux jours de pleine ou de nouvelle lune sur le tableau des jours de la lune.

On a écrit de même, sous les jours autres que ceux de syzygie, les heures qu'il faut prendre pour ces jours. Ainsi, la verticale du 9e ou du 24e jour de la lune donne les heures qu'il faut lire à la place de ceux du jour de syzygie; ce sera 7 heures au lieu de 12 heures, 8 heures au lieu de 1 heure, etc. Pour dresser ce second tableau, l'on a admis que les marées retardaient d'une demi-heure pendant quatre jours après et deux jours avant la syzygie, et que le retard était d'une heure tous les autres jours. On n'a pas

inscrit les heures pour les 1re et 3e colonnes, ni pour le 14e jour après la syzygie, mais pour les avoir il suffit d'ajouter une demi-heure au chiffre de gauche. La ligne horizontale relative à 12 heures le jour de syzygie sera donc celle de 12h 1/2 le 1er et le 16e jour de la lune, celle de 1 heure le 2e et le 17e, celle de 1h 1/2 le 3e et le 18e, et ainsi de suite. La basse mer à Rouen, que le routier compteur indique comme étant à 4 heures les jours de syzygie, aura lieu à 4h 1/2 le 1er et le 16e jour de la lune, à 5 heures le 2e et le 17e, etc. En reprenant l'exemple d'un bateau à vapeur filant dix nœuds et allant de Rouen au Havre, on voit qu'il devra partir de Rouen à 4h 1/2 le jour de la syzygie, à 5 heures le 1er et le 16e jour de la lune, et ainsi de suite, et qu'il arrivera au Havre à 10h 3/4 le jour de la syzygie, à 11h 1/4 le 1er et le 16e jour de la lune, etc. Les heures de départ et d'arrivée du bateau pour tous les jours de la lune sont donc données par des lignes horizontales. En partant à ces heures, il rencontrera toujours l'étale de flot un peu en aval de Quillebeuf. On aurait de même toutes les heures de départ ou d'arrivée si l'on avait combiné la marche du navire de manière à lui faire rencontrer l'étale de jusant en tout autre point de la Seine. Une horizontale menée par le point où il trouvera cet étale donnera les heures où il devra le rencontrer chaque jour de la lune.

Le routier compteur de M. Keller fournit un moyen fort commode de calculer la marche d'un navire. Il permet de la combiner très-aisément de manière à arriver sur un point indiqué d'avance au moment des étales de jusant ou de flot. En menant une ligne par les points correspondants aux pleines mers des divers ports, comme M. Keller l'a fait pour le routier compteur de la Manche et de la mer d'Allemagne, on peut s'arranger de façon à arriver sur un point donné à l'heure de la pleine mer, et à franchir un haut-fond au moment le plus favorable.

Tout en faisant remarquer combien le routier compteur

de M. Keller est d'une application commode et combien il peut être utile à la navigation en général, nous croyons devoir faire observer qu'il a besoin d'être encore perfectionné davantage pour les rivières à marée. Le routier-compteur suppose, en effet, que les vitesses moyennes des courants de flot et de jusant sur un fleuve sont les mêmes pendant toute la durée d'une lunaison. Mais il est loin d'en être ainsi, et les vitesses moyennes diffèrent d'un point à un autre de la rivière et d'un jour à l'autre de la lune. De même les heures des étales et de flot et de jusant et celles des pleines et basses mers ne varient pas exactement d'une heure ou d'une demi-heure d'un jour à l'autre. Pour une rivière à marée fréquentée par de grands navires qui ont à franchir plusieurs hauts fonds, il faut quelque chose de beaucoup plus précis. Le routier compteur de M. Keller suffit pour les petits bâtiments qui peuvent passer sur les seuils du fleuve un peu avant ou après les heures de la pleine mer ; pour les grands navires, qui ont besoin de profiter de toute la hauteur d'eau que fournit la marée et d'arriver sur le seuil le plus haut exactement à l'heure du plein, le routier compteur ne donne, tel qu'il est, qu'une première approximation.

Nous avons cherché si on pourrait le compléter, pour la Seine, avec les données qui sont entre nos mains. Nous croyons que ce serait facile, en indiquant, par des courbes tracées sur le routier, les cotes des hauteurs d'eau et les vitesses à tout instant en face de chacune des échelles hydrométriques ; un profil en long de la Seine donnerait les profondeurs sur chaque point en contre-bas d'une ligne horizontale prise au-dessous du plus bas étiage ; des courbes décrites au-dessus de la ligne horizontale à laquelle serait rapporté le thalweg, feraient connaître les hauteurs d'eau à ajouter en temps de crue pour les diverses hauteurs observées à l'échelle du pont de Mantes. Mais l'usage de ce routier, ainsi complété, ne serait-il pas trop difficile, et l'usage de ce tableau serait-il dès lors adopté dans la pra-

tique? Les courbes locales et celles des vitesses varient d'ailleurs avec trop de circonstances pour que l'on puisse en adopter quelques-unes sans craindre de fournir des données inexactes. Nous croyons qu'il vaudrait mieux avoir un *Manuel* qui ferait connaître les heures et les hauteurs des pleines et des basses mers sur chaque point, en raison de la hauteur des eaux d'amont, et des heures et des cotes des pleines et des basses mers à l'embouchure du fleuve. Des tables spéciales indiqueraient ensuite les vitesses des courants et les abaissements et les exhaussements progressifs des marées en chaque endroit pour les différentes amplitudes de leurs oscillations.

Points extrêmes où les marées se font sentir.—Les marées se font généralement sentir sur la Seine en vive-eau jusqu'au barrage de Poses, à 166 kilomètres du Havre et en morte-eau jusqu'à Elbeuf, à 17 kilomètres en aval de Poses. Pendant les crues, les marées de morte-eau cessent de se manifester vers Elbeuf. Avant l'achèvement des digues de la Seine jusqu'à Tancarville et la reconstruction du pont de Pont-de-l'Arche, elles ne se propageaient guère au delà de ce pont et de l'écluse qui rachetait la chute des eaux à son passage. Les marées de vive-eau y montaient alors ordinairement de $0^m.50$. Il résulte des observations faites par M. l'ingénieur Petit, que la marée s'y est élevée de $0^m.61$ le 26 septembre 1824. Le 9 août et le 7 octobre 1850, pendant une vive-eau d'étiage, l'eau y a monté de $0^m,70$. Un coup de vent y a produit, le 16 octobre 1856, une dénivellation de $0^m.83$. Ces marées exceptionnelles ont toutes eu lieu en vive-eau, en temps d'étiage et par des vents d'Ouest ou de Nord-Ouest.

Sur la Garonne, les marées de vive-eau se font sentir jusqu'à Castets, à 143 kilomètres de Verdon. Le gonflement y a été en étiage de $0^m.14$ le 7 septembre 1846, de $0^m.05$ seulement le 28 juillet 1847 et de $0^m.15$ le 25 septembre de la même année. Dans la crue de 7 mètres du 17 février

1847, la marée n'a été sensible que jusqu'à Cadillac, à 18 kilomètres au-dessous de Castets.

En morte-eau la limite que l'ondulation de la marée atteint dans les étiages, paraît être à Langon, à 7 kilomètres en aval de Castets. Avec une crue de $3^m.32$, le 24 février 1847, on a cru apercevoir un léger gonflement à la Garonnelle, mais il a été au moins très-marqué à Cadillac, à 125 kilomètres du Verdon.

Sur la Loire, en temps d'étiage, la marée se fait sentir en vive-eau jusqu'à Mauves, à 68 kilomètres de Saint-Nazaire, et en morte-eau, seulement jusqu'à un point situé entre Nantes et Bellevue. En temps de crue, les marées de morte-eau se propagent encore jusqu'à la Roche-Maurice, à 5 kilomètres en aval de Nantes; les marées de vive-eau se font presque toujours sentir jusque sous les quais de cette dernière ville.

Vitesse des courants de jusant et de flot.— Des observations sur les vitesses des courants de jusant et de flot ont été faites à différentes époques et sur plusieurs points de la Seine. Elles ont eu généralement lieu en temps d'étiage, ont été entreprises avec des flotteurs et sont relatives aux vitesses maxima à la surface du fleuve.

Il est facile de représenter graphiquement les vitesses de l'eau sur un point donné par des courbes. On trouvera celles qui indiquent les vitesses des courants sur la Seine, sur la Garonne et sur la Loire, dans les planches qui sont jointes à ce travail (*fig.* de 44 à 52).

Le 13 novembre 1856, en vive-eau, la Seine étant à Mantes à $0^m.45$ au-dessous de l'étiage ordinaire, la plus grande vitesse du flot, observée à Quillebeuf, a été de $2^m.14$ par seconde, environ une demi-heure après la fin de l'étale de jusant. La plus grande vitesse du jusant sur le même point a été de $1^m.775$ par seconde, et ne s'est produite qu'environ 4 heures après la fin de l'étale de flot. En morte-eau, le 23 août 1856 (*fig.* 45), l'eau étant à Mantes à $0^m.18$

au-dessus de l'étiage ordinaire, la plus grande vitesse du flot a été de $1^m.947$ et a été observée environ une heure après la fin de l'étale de jusant. La plus grande vitesse du jusant, le même jour, a été de $1^m.099$ par seconde.

Les vitesses du jusant sont généralement moindres que celles du flot, sur la Seine, en étiage. La plus grande vitesse des courants de flot à Quillebeuf se produit habituellement une demi-heure après la fin de l'étale de jusant en vive eau, et trois quarts d'heure après en morte-eau.

On remarque que les vitesses diminuent à mesure qu'on s'éloigne de l'embouchure du fleuve. Ainsi, le 18 août 1856 en vive-eau, la Seine étant à $0^m.15$ au-dessus de l'étiage ordinaire à Mantes, la vitesse maximum du jusant a été de $1^m.46$ par seconde à Quillebeuf, de $1^m.24$ à Villequier, et de $0^m.71$ à Duclair, la vitesse maximum du flot a été de $2^m.22$ par seconde à Quillebeuf, de $1^m.84$ à Villequier et de 1 mètre à Duclair. En morte-eau, le 23 août 1856, la plus grande vitesse du jusant a été de $1^m.099$ à Quillebeuf, de $0^m.998$ à Villequier et de $0^m.568$ à Duclair, et la plus plus grande vitesse du flot de $1^m.947$ à Quillebeuf, de $1^m.075$ à Villequier et de $0^m.65$ à Duclair. Toutes ces observations sont relatives aux étiages.

En temps de crue les vitesses des courants de flot deviennent moindres. Ces courants cessent même quelquefois de se former en amont de Villequier, et le jusant seul se manifeste pendant toute la durée de la marée. Sur la partie inférieure du lit endigué de la Seine maritime, les courants de flot sont plus ou moins rapides que ceux de jusant, suivant la hauteur des eaux dans la partie du fleuve non sujette aux marées, mais ils ne cessent jamais complétement de se produire.

Sur la Loire, des expériences faites en vive et en morte-eau, en temps d'étiage, les 9 et 16 septembre 1858, en face de Saint-Nazaire (fig. 48 et 49), ont fait voir : 1° que la vitesse maximum du flot était de 2 mètres en vive-eau, et

de $1^m.03$ en morte-eau, et la vitesse maximum du jusant de $1^m.33$ en vive-eau et de $0^m.83$ en morte-eau ; 2° que la vitesse maximum du flot a eu lieu 2 heures après l'étale de jusant en vive-eau et 2 heures avant l'étale de flot en morte-eau : la vitesse maximum du jusant a eu lieu $3^h.15'$ avant l'étale de jusant en vive-eau et 5 heures après l'étale de flot en morte-eau; d'où il résulte que les vitesses maxima du jusant et du flot ont eu lieu plus tôt pendant les marées de syzygie que pendant les marées de quartier ; 3° que la vitesse moyenne du jusant a été de $0^m.998$ en vive-eau et de $0^m.809$ en morte-eau, et la vitesse moyenne du flot de $1^m.055$ en vive-eau et de $0^m.809$ en morte-eau. La vitesse moyenne du flot a été plus grande que celle du jusant, contrairement à ce qui a eu lieu sur la Garonne, mais on conçoit que cela doit varier beaucoup avec l'amplitude des marées et la quantité des eaux du fleuve. C'est du reste ce qu'indiquent les formules du débit d'une rivière à marée que nous avons indiquées dans la première partie de ce travail.

Les mêmes jours des observations ont été faites à Nantes dans le bras de Saint-Félix (fig. 48 et 49). Il en résulte que les vitesses y sont généralement moindres qu'à Saint-Nazaire, tant en vive-eau qu'en morte-eau. On observe donc, sur la Loire comme sur la Seine, que la vitesse des courants diminue à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Cette loi nons paraît générale en temps d'étiage. En temps de crue, elle est encore vraie pour les courants de flot. Les largeurs locales et accidentelles du fleuve doivent d'ailleurs avoir une grande influence sur les vitesses qu'on y remarque ; l'observation que nous venons de faire ne peut s'appliquer qu'à une rivière considérée à la fois sur une assez grande longueur de son cours pour que les variations partielles de sa largeur soient sans influence sur les résultats généraux.

Les vitesses des courants ont été observées simultanément, au moyen d'un loch, en vive-eau, sur la Garonne et

la Dordogne, près du confluent de ces deux rivières (*fig.* 50). Deux séries d'expériences ont été faites : l'une le 15 octobre 1845, jour de la pleine lune, le coefficient de la marée étant $0^m.96$; la hauteur des eaux était de 2 mètres à l'échelle de Castets, dont le zéro est à l'étiage ordinaire ; l'autre, le 31 du même mois, lendemain de la nouvelle lune, le coefficient de la marée étant $0^m.99$, et la hauteur de l'eau dans la Garonne à l'échelle de Castets étant $0^m.88$. Il est résulté de ces observations : 1° que la vitesse du flot est à peu près la même dans les deux rivières ; qu'après la première période du flot elle devient cependant un peu plus grande dans la Dordogne que dans la Garonne ; 2° que dans les deux marées de vive-eau moyenne où ont eu lieu les observations, elle a atteint $1^m.33$ au maximum ; 3° que la vitesse du jusant, avec des hauteurs d'eau de 2 mètres à $0^m.88$ au-dessus de l'étiage, est supérieure, sur la Garonne et la Dordogne à celle du flot ; 4° qu'elle s'est élevée au maximum à $1^m.50$. Ces vitesses maximum ont eu lieu aux deux cinquièmes environ du jusant et à la moitié du flot. Dans les marées extraordinaires et à l'époque des crues, elles deviennent plus fortes, surtout en certains points où les courants se portent avec violence, par exemple, devant Lagrange, Macau et Blaye.

Les vitesses des courants à l'entrée de la Gironde, en face de la pointe de Grave, ont été constatées en vive et en morte-eau (fig. 52). On a remarqué : 1° que la vitesse maximum des courants atteint quelquefois sur ce point 2 mètres par seconde ; 2° qu'elle est à peu près la même pendant le flot que pendant le jusant ; 3° que cependant la vitesse moyenne du jusant est un peu supérieure à celle du flot. Les expériences dont on a déduit ces conséquences ont été faites pendant les basses eaux de la Garonne. Leurs résultats ne sont donc applicables qu'aux temps d'étiage.

Limites du renversement des courants. — Sur la Seine, le

gonflement des eaux par l'effet de la marée ne produisait jamais de changement dans le sens des courants en amont de Martot, avant la rectification du lit de la Seine entre Quillebeuf et Tancarville et la reconstruction du pont de Pont-de-l'Arche. La limite du renversement des courants dans les grandes marées et en temps d'étiage est maintenant entre Pont-de-l'Arche et Martot. Dans les crues et les mortes-eaux, le courant de flot ne se fait sentir que beaucoup plus bas. Quand une morte-eau coïncide avec une grande crue, on voit les courants ne changer de sens que près de Villequier.

Sur la Garonne, le gonflement de la marée n'amène jamais de changement dans la direction du courant à Castets, ni même à Langon. A partir de La Garonnelle, le courant tourne dans les grandes marées, et cet effet est habituel pendant l'été à Cadillac et surtout à Rions. Dans les crues, le courant de flot ne se fait sentir que beaucoup plus bas. Ainsi, dans la marée de morte-eau du 24 février 1847, qui correspondait à une crue de $3^{m}.55$ seulement dans la Garonne, le courant n'a pas tourné à Quinsac. Le même jour, à Bordeaux, le courant de flot n'a commencé à se faire sentir que deux heures après la basse mer, lorsque la marée avait monté de $1^{m}.50$; il ne s'est maintenu que pendant une heure et demie, et le jusant a recommencé trois quarts d'heure avant la pleine mer. Dans la marée de vive-eau du 17 février 1847, qui était accompagnée d'une crue de 7 mètres, le jusant a été seulement amorti à Bordeaux pendant $1^{h}.40'$, mais le courant n'a pas tourné. Lorsque les crues sont fortes, le jusant y continue sans interruption, quoique le gonflement dû à la marée soit parfois de plus de $3^{m}.50$. Il arrive quelquefois que les navires n'évitent pas à Lagrange, et l'on dit qu'on a vu le même fait se produire au Bec-d'Ambès; mais dans la partie supérieure de la Gironde les courants tournent toujours.

Durée des courants de jusant et de flot. — La durée des

courants de jusant est comprise entre la fin de l'étale de flot et le commencement de l'étale de jusant, et celle des courants de flot entre la fin de l'étale de jusant et le commencement de l'étale de flot. Cette durée varie donc avec ces étales et dépend des instants où ils se produisent. Ainsi, sur un même point d'un fleuve, l'heure de l'étale de jusant s'éloigne de celle de la basse mer pendant les crues, tandis que le moment de l'étale de flot se rapproche de celui de la pleine mer et finit par le précéder; pour ces deux raisons la durée des courants de flot diminue et celle des courants de jusant augmente. Des motifs inverses font que quand un étiage succède à une crue, le jusant dure moins et les courants de flot continuent au contraire plus longtemps.

La durée des courants de flot et de jusant sur les différents points de la Seine est extrêmement variable. Ils durent tantôt plus à Quillebeuf qu'à Duclair, tantôt plus à Duclair qu'à Quillebeuf. Nous n'avons pas encore pu faire assez d'études et d'observations sur les étales pour pouvoir chercher d'autres lois de la durée des courants de flot et de jusant que celle que nous venons d'indiquer tout à l'heure. Néanmoins, on a eu l'occasion d'observer, pendant la construction des digues de la Seine entre Quillebeuf et Tancarville, que toutes les fois que les travaux rendaient l'entrée des eaux de marée dans la Seine plus difficile, la durée des courants de flot diminuait, et qu'elle devenait plus grande quand les marées arrivaient plus aisément dans ce fleuve. Les obstacles qui se rencontrent à l'embouchure des rivières à marée ont donc pour effet de diminuer la durée des courants de flot.

Effet des crues et des étiages sur le fond mobile de la Seine. — Le fond de la Seine maritime est en général formé de sables vaseux. Des profils en long du thalweg, qui ont été fréquemment relevés entre la Mailleraye et Quillebeuf, ont fait voir que pendant les étiages ces sables paraissent re-

monter avec les courants de flot et que le sommet des traverses se reporte vers l'amont. Après les crues, ces sommets se trouvent plus vers l'aval et le thalweg en général s'abaisse. Ces effets s'expliquent aisément par la prépondérance relative des courants de jusant et de flot. On observe aussi que dans les étiages, le fond de la Seine tend, pour ainsi dire, à se niveler : les bords s'abaissent et le thalweg se remplit et s'exhausse. Dans les crues c'est l'inverse qui se produit : les côtés s'élèvent et le thalweg se creuse. Si l'on rapproche ceci de ce fait que dans la baie de Seine, en aval de Tancarville, le flot bouleverse les bancs et comble les chenaux tandis que le jusant y creuse les passes de la Seine, on reconnaît que, dans les étiages, les courants de flot tendent à remplir le thalweg aux dépens des bords en nivelant le fond de la rivière et qu'ils entraînent en outre dans la Seine une partie des sables de son embouchure. En temps de crue, le jusant creuse le thalweg et l'approfondit, en rejetant les sables qui s'y trouvent vers les bords du lit du fleuve et en repoussant en partie ces sables vers la mer.

Enfin l'on observe que même dans la partie endiguée de la Seine, les crues et les étiages amènent des changements dans la position de la ligne du thalweg et dans la direction que doivent suivre les grands navires. Toutefois ces variations semblent disparaître en amont de Duclair.

Effets des glaces sur les mouvements de la marée. — Les glaces, qui couvrent les fleuves pendant les hivers rigoureux, entravent la marche de l'ondulation des marées et l'arrêtent même quelquefois tout à fait. Dans l'hiver de 1829 à 1830, la marée avait cessé complétement de se faire sentir à Rouen et des boutiques s'étaient installées sur la couche épaisse de glace qui couvrait la Seine; à cette époque, la marée se propageait encore en vive-eau jusqu'à Duclair ; à la Mailleraye, la marée n'a jamais cessé de se faire sentir en vive-eau, même dans les plus grands froids. Ainsi, pendant l'hiver de 1788 à 1789, où il a gelé du 15

décembre au 25 février, où l'on passait la Seine en voiture à la Mailleraye et où les charrettes avaient creusé des ornières de 7 à 8 centimètres dans la glace, la croûte glacée qui couvrait le fleuve, se brisait sur les bords au moment des marées de vive-eau. Il en a été de même dans l'hiver de 1792 à 1793 où l'épaisseur de la glace à la Mailleraye, constatée par une expérience spéciale, était de 18 pouces ($0^m.50$). La Seine a été prise plusieurs fois depuis d'un côté à l'autre sur le même point, et l'on a toujours remarqué que dans ce cas le mouvement des marées était plus faible qu'en temps ordinaire. En 1824, en 1830 et en 1839, la Seine a été prise d'un bord à l'autre à Caudebec et à Villequier et a pu être traversée à pied sur ces deux points. En 1839 elle a été traversée en voiture à la Mailleraye. Elle paraît n'avoir jamais été prise complétement en face de Quillebeuf.

Nous croyons qu'on peut conclure de ces faits, que quand les glaces ont une assez grande épaisseur, elles entravent la propagation de l'ondulation de la marée dans les fleuves, et qu'elles l'arrêtent même tout à fait dans les parties où elle n'a qu'une faible amplitude.

NOTE A.

FEUILLES D'OBSERVATIONS DE HAUTEUR D'EAU EMPLOYÉES SUR LA SEINE MARITIME.

PONTS ET CHAUSSÉES.

DÉPARTEMENT 8

NAVIGATION DE LA SEINE 4e SECTION.

8 ARRONDISSEMENT.

OBSERVATIONS DE HAUTEUR D'EAU

FAITES A L'ÉCHELLE D

Pendant le mois d 186 .

INSTRUCTIONS

POUR LA TENUE DES FEUILLES DE HAUTEUR D'EAU SUR LA SEINE MARITIME.

Lunaisons. — L'agent chargé de la tenue des feuilles devra indiquer, dans la première colonne, au droit de leur date, chacune des lunaisons du mois avec son heure, telle qu'elle se trouve dans les calendriers. Il mettra les coefficients de marée entre parenthèses auprès des pleines et des nouvelles lunes qui leur correspondent.

Basses et pleines mers. — Les heures de pleine et de basse-mer devront être notées avec le plus grand soin. L'observateur devra régler fréquemment sa montre, soit d'après celle du conducteur chargé de la surveillance de sa station, soit d'après la pendule du phare le plus voisin. L'heure adoptée pour toutes les observations de la Seine maritime sera celle de Paris, prise en temps moyen.

Quand les heures seront comprises entre quatre et neuf heures, on fera toujours connaître si l'heure inscrite est celle du matin ou celle du soir.

Lorsqu'au moment de la basse-mer ou de la pleine mer l'eau restera un certain temps au même niveau, on prendra pour heure de la basse ou de la pleine mer l'heure ou l'eau commence à monter ou à descendre. On notera en même temps, dans la colonne des ob-

servations, les heures où elle a commencé à être à la cote de basse ou de pleine mer, et celle où elle a cessé de s'y trouver. On aura soin de reproduire en même temps, dans la colonne des observations, la cote où l'eau sera restée stationnaire.

Étale de jusant. — Un peu avant l'arrivée du courant du flot, l'eau commence à monter, bien que les courants continuent à couler vers la mer. Mais il arrive bientôt un instant où les courants s'arrêtent et où il y a étale. A ce moment, les navires ne portent plus sur leurs ancres, les corps flottants cessent de descendre la Seine, les bouées coniques ne sont plus couchées par le courant et leur axe devient vertical. L'heure du commencement de l'étale et la hauteur de l'eau correspondante doivent être notées avec soin. Elles indiquent le temps pendant lequel les courants ont continué à se diriger vers l'aval après le moment de la basse mer et la hauteur dont l'eau a monté avant le commencement de l'étale.

On devra noter de même l'heure et la hauteur de l'eau à la fin de l'étale. La fin de l'étale est indiquée par le renvoi du flot, par l'évitage des navires et par les bouées coniques qui s'inclinent vers l'amont. Ces nouvelles observations donneront la durée de l'étale de jusant et la quantité dont l'eau se sera élevée pendant cet étale.

Les hauteurs d'eau relatives à l'étale de jusant et à l'étale de flot devront être prises au commencement et à la fin de l'étale au milieu du fleuve.

Au commencement de l'étale de jusant, le courant d'èbe persiste plus longtemps au milieu du fleuve que sur les bords, et, à la fin de l'étale, le courant de flot se forme plus tard au milieu que sur les rives du fleuve. Des colonnes distinctes sont réservées aux heures où l'étale de jusant commence et finit, soit au milieu, soit sur les bords du fleuve, au droit de l'échelle d'observation de hauteur d'eau.

L'étale de jusant, qui s'observe presque toujours en morte-eau, n'a souvent pas lieu en vive-eau, surtout quand il y a de la barre (1). On devra indiquer ce fait en mettant des guillemets dans les colonnes correspondantes à l'étale de jusant. Toutefois, comme même dans ce cas, la barre arrive plus tard au milieu qu'aux bords du fleuve, on indiquera les heures de l'arrivée du courant de flot sur les rives et au milieu, en les portant dans les colonnes des heures du commencement de l'étale de jusant. L'heure de l'arrivée de la barre, même sur les rives, diffère souvent de l'heure de la basse mer.

---

(1) Nom sous lequel on désigne le mascaret sur la Seine.

Étale de flot. — L'étale de flot, qui se produit toujours sur la Seine, donne lieu à des observations analogues à celles de l'étale de jusant. On devra noter avec le plus grand soin les heures où il commence et où il finit, au milieu et sur les bords de la Seine, ainsi que les hauteurs de l'eau à son commencement et à sa fin au milieu du fleuve. Les observations relatives à l'étale de flot donnent immédiatement la durée du courant de flot après le moment de la pleine mer, la durée de l'étale de flot et l'abaissement de l'eau depuis la pleine mer jusqu'au commencement et à la fin de l'étale; enfin, l'on peut en conclure aisément les profondeurs d'eau que la navigation descendante a dû trouver sur les traverses au commencement du jusant.

Direction et intensité du vent. — La direction du vent devra être prise d'après celle des nuages. Par un effet de perspective, les nuages semblent se séparer et s'éloigner à droite et à gauche en marchant vers l'observateur, et paraissent se rejoindre et se rapprocher en venant de droite et de gauche quand ils s'éloignent de lui. L'observateur devra se régler, autant que possible, sur les nuages qui passeront au-dessus de sa tête.

Les coteaux donnent quelquefois aux vents, dans la vallée de la Seine, une direction différente de celle qu'ils ont dans la partie la plus élevée de l'atmosphère. Quand ce fait se produira, l'observateur devra le signaler dans la colonne des observations, en ayant soin d'indiquer, dans cette même colonne, la direction du vent dans la vallée. Cette dernière direction lui sera donnée soit par les girouettes des maisons, soit par la fumée des cheminées, soit par les voiles des embarcations naviguant sur le fleuve.

Quand les nuages se trouveront disposés sur plusieurs couches ayant des directions différentes, l'observateur le mentionnera dans la colonne des observations. Il indiquera, dans cette même colonne, la direction et l'intensité du vent données par la couche supérieure des nuages, et il portera à la colonne intitulée : *Direction et intensité du vent*, la direction et l'intensité du vent données par la couche des nuages inférieurs.

Il arrive fréquemment que le vent change ou qu'il y a de la pluie au moment de l'arrivée du flot. L'observateur devra signaler ce fait avec le plus grand soin dans la colonne des observations.

L'intensité du vent sera indiquée par les mots *brise légère*, *petite brise*, *bonne brise*, *forte brise*, *coup de vent*. Enfin, il pourra y avoir un *calme plat*, ou bien une *tempête* ou un *ouragan*.

Mois

LUNAISONS.	DATES.	BASSES MERS.		ÉTALE DE JUSANT.						PLEINES MERS.	
				COMMENCEMENT.			FIN.				
				HEURES			HEURES				
		Heures.	Hauteurs.	au bord.	au milieu	Hauteurs.	au bord.	au milieu.	Hauteurs.	Heures.	Hauteurs.
	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
	7										
	8										
	9										
	10										
	11										
	12										
	13										
	14										
	15										
	16										
	17										
	18										
	19										
	20										
	21										
	22										
	23										
	24										
	25										
	26										
	27										
	28										
	29										
	30										
	31										

∂

Ordonnée du zéro de l'échelle rapporté au plan de comparaison du nivellement de la Seine, passant à 75m,24 au-dessus de l'échelle hydrométrique du pont de la Tournelle, à Paris. . . . . m.

ÉTALE DE FLOT.						DIRECTION ET INTENSITÉ du vent.	OBSERVATIONS.
COMMENCEMENT.			FIN.				
HEURES		Hauteurs.	HEURES		Hauteurs.		
au bord.	au milieu.		au bord.	au milieu.			

Certifié par l soussigné,

A le 186

Colonne des observations. — Outre les différents faits désignés ci-dessus, l'observateur devra indiquer soigneusement dans la colonne des observations, les crues, les glaces, les chutes de neige et de grêle, les orages, le tonnerre, les brouillards, l'apparition de la barre, sa hauteur approximative, les éteules, les interruptions de la navigation et leur cause, et tous les accidents survenus sur la Seine.

Recommandation générale. — La plus scrupuleuse exactitude est expressément recommandée pour toutes les observations en général, mais plus particulièrement encore pour celles des cotes de hauteur d'eau et des heures que l'on doit indiquer.

OBSERVATIONS DU CONDUCTEUR.

NOTE B.

EXTRAIT D'UN RAPPORT DE M. LECHALAS,

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES A NANTES,

en date du 12 avril 1859,

A L'APPUI DU PROJET D'ENDIGUEMENT DE LA BASSE-LOIRE.

« Nous avons été conduit à étudier la question des débits dans la Basse-Loire, ou plus généralement, dans la partie maritime des fleuves.

« Dans un cours d'eau ordinaire on mesure les vitesses à diverses profondeurs, en plusieurs points d'un profil en travers, et on arrive à une valeur exacte du débit, pour l'état du cours d'eau qui correspond aux observations. On peut répéter celles-ci dans des circonstances assez variées pour construire la courbe des débits, en portant les hauteurs au-dessus de l'étiage sur la ligne des abscisses, et en donnant aux ordonnées des longueurs proportionnelles aux débits.

« Dans la partie maritime d'un fleuve, les vitesses changent en chaque point à tout instant; il semble d'abord impossible d'arriver à construire, pour un profil en travers, la courbe des débits pendant le jusant et le flot. On ne pourrait du moins arriver au but par des mesures de vitesses qu'au moyen d'observations si compliquées qu'elles seraient presque impraticables; mais nous sommes parvenus à résoudre le problème avec une simplicité vraiment inespérée, au moyen de simples observations de hauteurs à des échelles. Malheureusement, il faut ensuite faire dans le cabinet des calculs très-longs.

« Considérons un profil en travers, levé au Pellerin, par exemple. Des échelles seront placées à l'avance à Mauves (point au-dessus duquel la marée ne se fait pas sentir), à Belle-Vue, à Nantes, Chantenay, Roche-Maurice, la Haute-Indre, la Basse-Indre, au droit de la digue de Lamothe (extrémité aval), à Couéron, au Pellerin, et enfin, en aval, jusqu'à Saint-Nazaire. Les zéros de toutes les échelles correspondront à un plan horizontal passant par le zéro

de Saint-Nazaire. Des observateurs, munis de montres bien réglées, noteront les hauteurs d'eau de 5′ en 5′ ou de quart d'heure en quart d'heure, suivant le degré d'exactitude qu'on se proposera d'obtenir.

« Lorsque le jusant commence au Pellerin, la marée monte encore à Nantes. La surface du fleuve présente des formes variées, avec pentes et contre-pentes, aux divers moments de la marée. Mais, avec nos observations aux échelles, nous pouvons construire le profil en long de la Loire en un moment quelconque. On conçoit que si les échelles sont assez rapprochées et si l'on a un bon plan du fleuve, il sera possible de calculer les variations du volume des eaux entre Mauves et le Pellerin, pour chaque quart d'heure par exemple.

« Soient, d le débit fluvial par seconde à Mauves, pour la hauteur du fleuve pendant les observations (d sera donné par la courbe des débits fluviaux construite à l'avance. On aurait une valeur de d pour chaque quart d'heure si le niveau du fleuve variait en amont de la limite des marées).

« V, V^1, V^2, etc., les variations successives du volume d'eau emmagasiné entre Mauves et le Pellerin, variations données pour chaque quart d'heure, par les observations aux échelles et par les calculs dont il a été parlé plus haut.

« D, D^1, D^2, etc.. les débits moyens par seconde, au Pellerin, correspondant à chaque quart d'heure. Ce sont les inconnues du problème.

« Le réservoir formé par la Loire entre Mauves et le Pellerin reçoit par l'amont, pendant le premier quart d'heure, une quantité d'eau $= d \times 900$; son volume d'eau diminue, dans le même temps, de V (V sera négatif si le volume d'eau du réservoir augmente).

« Donc le débit au Pellerin, ou $D \times 900$ sera égal à $V + d \times 900$; d'où

$$D = \frac{V}{900} + d.$$

« Pendant le jusant, V et D sont positifs. Quelque temps après le commencement du flot $V = 0$, et $D = d$. Puis, V devient négatif, mais est d'abord très-petit; il arrive un moment ou $\frac{V}{900} = -d$, alors $D = o$. La période qui sépare le moment de la basse-mer du moment où $D = o$ pourrait être appelé *flot-jusant*. Il y a flot au point de vue de la variation du niveau qui est déjà dans la phase d'ex-

haussement; il y a jusant au point de vue de l'écoulement, qui a encore lieu d'amont en aval.

« Tant que $\frac{V}{900}$ est négatif et $> d$, D est négatif et le flot continue. Après avoir augmenté jusqu'à un certain maximum en restant négatif, $\frac{V}{900}$ diminue et revient à la valeur $-d$. Alors $D = o$. Mais à ce moment, la marée n'est plus à son maximum de hauteur (surtout un jour de vive-eau, et si l'eau est basse dans la partie purement fluviale de la Loire); car, au moment de la haute-mer au Pellerin, le flot est dans toute sa force à Nantes; pour que V soit négatif et petit, il faut donc que la grande augmentation de volume qui a lieu en amont soit en partie balancée par une diminution dans le voisinage du Pellerin. il y a par conséquent une période mixte pendant laquelle D est encore négatif, tandis que le niveau du fleuve s'abaisse au Pellerin. On pourrait désigner cette période sous le nom de *jusant-flot* (abaissement de niveau avec courant d'aval en amont).

« On voit que l'idée bien simple de déterminer le débit, en un point quelconque de la partie maritime d'un fleuve, et fonction du débit fluvial et de la variation de l'emmagasinement en amont, conduit à une solution pratique qui nous permet d'annoncer à l'avance tout le détail des phénomènes de la marée. Malheureusement les valeurs V, V', etc., ne peuvent être déterminées avec une exactitude suffisante qu'au moyen d'un travail assez considérable. Il y a des points de passage à trouver, etc.; c'est un véritable calcul de terrassements.

« Nous construirons les courbes des débits, en vive-eau et en morte-eau, en temps d'étiage et pendant les crues, pour tous les profils où nous avons placé nos échelles d'observations. Les courbes des vitesses moyennes seront déduites des courbes des débits au moyen des profils en travers, levés avec soin, au droit de chaque échelle, et qui permettront de calculer la section d'écoulement pour la hauteur d'eau correspondant à chaque valeur du débit. »

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

AVERTISSEMENT..... 1

CHAPITRE Ier.

LOIS GÉNÉRALES DU MOUVEMENT DES MARÉES DANS LES FLEUVES.

Mouvement général des marées dans les fleuves..... 3
Observations faites sur la Seine..... 6
Observation de la marche d'une marée..... 8
Marées de vive-eau et marées de morte-eau..... 9
Mouvements de chaque molécule fluide et des corps flottants; salure des eaux à l'embouchure des fleuves..... 10
Les hauts fonds augmentent les vitesses des courants de marée et diminuent la hauteur des pleines mers en amont.. 12
Effet des barrages construits sur les rivières à marée..... 13
Quantité d'eau de marée qui remonte dans un fleuve et qui en descend..... 13
Courbes des vitesses et des débits..... 18
Influence relative du jusant et du flot sur l'approfondissement des chenaux à l'embouchure des rivières à marée..... 18
Variations périodiques des quantités d'eau entrées et sorties d'une rivière à marée..... 19
Accroissement progressif des sections d'une rivière à marée en descendant vers son embouchure..... 22
Calcul des vitesses moyennes dans une section de rivière à marée et largeur à lui donner entre deux digues à construire parallèlement à son cours..... 23
Propagation des marées dans les fleuves en vive et en morte-eau..... 24

CHAPITRE II.

ÉTUDE DU RÉGIME DES MARÉES DANS LES FLEUVES.

Pages.

Principales causes qui agissent sur le mouvement des marées 26
Profils momentanés 28
— de vive-eau 29
— de morte-eau 33
Courbes locales 35
— de vive-eau 35
— de morte-eau 38
Conclusions qu'on peut tirer des profils momentanés et des courbes locales 39
Hauteur à assigner aux digues longitudinales à établir le long des rivières à marée 40
Lieux géométriques des pleines et des basses mers 41
— des pleines et des basses mers sur la Seine. 42
— des pleines et des basses mers sur la Loire. 44
— des pleines et des basses mers sur la Garonne et la Gironde 46
Conclusions à tirer de l'examen des lieux géométriques des pleines et des basses mers 47
Nécessité de tenir compte de l'abaissement des basses mers en amont, dans les projets d'amélioration de l'embouchure des rivières à marée ; avantages et inconvénients de cet abaissement 48
Élargissement progressif à donner à l'embouchure d'un fleuve. 51
Retards des étales de jusant sur les basses mers 51
— des étales de flot sur les pleines mers 54
Effet des élargissements et des rétrécissements sur les étales. 57
Action du vent sur les étales 59
Observations diverses sur les étales 59
Anomalies remarquables 62
Vitesse de propagation de la basse et de la pleine mer 63
— de propagation des étales 66
Détermination des hauteurs que les pleines et des basses mers doivent atteindre et des quantités d'eau que l'on trouvera sur les hauts fonds d'une rivière à marée 67
Vitesse de propagation des variations de hauteur de la Seine en amont, depuis Poissy jusqu'à la mer 73

Pages.

Courbes annuelles des basses et des pleines mers aux différentes échelles hydrométriques..... 74
Lieux géométriques des étales de jusant et de flot. Courbes diverses relatives aux heures de ces étales et des pleines et des basses mers..... 75
Routier-compteur de M. Keller..... 77
Points extrêmes où les marées se font sentir..... 82
Vitesse des courants de jusant et de flot..... 83
Limites du renversement des courants..... 86
Durée des courants de jusant et de flot..... 87
Action des crues et des étiages sur le fond mobile de la Seine. 88
Effet des glaces sur le mouvement des marées..... 89
Note A..... 91
Note B..... 97

FIN DE LA TABLE.

Paris. — Imprimé par E. Thunot et Cᵉ, rue Racine, 26.

[redacted]

cr

1 rol - att

[redacted]

n.

This book should be returned to the Library on or before the last date stamped below.

A fine of five cents a day is incurred by retaining it beyond the specified time.

Please return promptly.

Eng 1018.61.7
Etude sur le mouvement des marees
Cabot Science 006271727
3 2044 091 858 878